INVESTIGACION y CIENCIA

COMUNIDADES PREHISPANICAS DE BAJA CALIFORNIA

SIDA E INYECCION DE DROGAS

LA METAFISICA DE LAS PARTICULAS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



FALSIFICACION DIGITAL

ABRIL 1994
700 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Abril de 1994 Número 211



SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mónica Murphy: *Espejos líquidos*; Ernesto Sánchez-Herrero: *Arquitectos moleculares del diseño corporal*; Luis Bou: *¿Ver es creer?*, *Fermat resiste*. *Ciberespacio* y *Juegos matemáticos*; M. Puigcerver: *Aerosol de sulfatos y cambio climático*; Ana María Rubio: *Sida e inyección de drogas* y *Algo para mascar*; Joandomènec Ros: *Aves del terror sudamericanas*; Juan Pedro Campos: *La metafísica de las partículas* y *Superconductores*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; J. M. García de la Mora: *Ensayo*.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Jack Harris, *Visual Logic*

Página	Fuente
9-15	J. M. Fullola, M. M. Bergadà, V. del Castillo, M. A. Petit y A. Rubio
17	Robert J. Sica, Universidad de Ontario Oeste
18	Boris Starosta
19	Guy Plante, Universidad de Laval
20	B. Starosta (*arriba*), Terry Byers, Co. Lockheed (*izqui.*), Guy Plante (*drcha.*)
21	Robert J. Sica
23	Tomo Narashima
24	William McGinnis (*arriba*), Tomo Narashima (*abajo*)
25	Tomo Narashima
26	William McGinnis (*abajo*)
27	Jared Schneidman/JSD
28	Tomo Narashima
35	Mafo Plata
40-41	Fotografía original de *AP/World Wide Photos* (*izquierda*), imagen de Paul Higdon/*New York Times* (*centro*), imagen de Angela Perkins (*derecha*), manipulación de color a cargo de Jack Harris/Visual Logic (*arriba en el centro, arriba a la derecha y abajo*)
42	Reuters/Bettmann (*arriba*), foto del Dpto. de Defensa de los EE.UU. (*abajo*)
43	Foto original de la NASA; versión manipulada digitalmente cortesía de Time Inc. Picture Collection
44	Foto original de Abraham Lincoln por Alexander Gardner, archivo Bettmann; foto original de Marilyn Monroe cortesía de Personality Photos, Inc.; imágenes digitales de Jack Harris/Visual Logic
45	Imagen de Wade Hokoda
46-47	Roberto Osti
48-49	Jeffrey T. Kiehl y Bruce P. Briegleb, Centro Nacional de Investigación Atmosférica de los EE.UU.; colores manipulados por Jason Kufer
50	Runk/Schoenberger, Grant Heilman Photography, Inc.
51	Tad Anderson, Universidad de Washington
54	Andrew Lichtenstein/Impact Visuals
55	Peter Haley/*Morning News Tribune*, Tacoma, Washington
56-58	Guilbert Gates/JSD
59	Andrew Lichtenstein/Impact Visuals
60	Guilbert Gates/JSD (*izquierda*), cortesía de la secretaría de dirección de GG&GD, Amsterdam (*derecha*)
62-63	Roberto Osti
64	Patricia J. Wynne
65	Ronald Orenstein/Animals/Animals (*izquierda*), Francisco Erize/Bruce Coleman, Inc. (*derecha*)
66	Michael O. Woodburne, Universidad de California (*abajo*)
67	Patricia J. Wynne
68-69	John Bird, Laboratorio del SSC.
72	David Sams/Texas Inprint (*arriba*), Fermilab Visual Media Services (*abajo*)
73	CERN Media Service, (*arriba y abajo*)
74	Frank Veronsky
75	Laboratorio Nacional Argonne
85	Kathy Konkle
86-89	Documents Pour le Science



LA PORTADA muestra una imagen obtenida en ordenador por fusión de una fotografía de Abraham Lincoln, tomada en 1863, con un fotograma de Marilyn Monroe, tomado en 1955. Se transfirieron a un ordenador con un escáner, para su posterior manipulación por medios digitales. El proceso está descrito en el artículo "¿Ver es creer?", por William J. Mitchell, que aparece en este mismo número. La capacidad para transformar así las fotografías ha puesto fin a un período de 150 años, durante el cual la fotografía parecía constituir una prueba irrebatible.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada ojd

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Filmación: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «En siete años la Fundación Armour se ha convertido, a partir sólo de un nombre y una buena idea, en una de las primeras instituciones de su naturaleza de Estados Unidos. La 'buena idea' no era sino brindar un servicio de investigación industrial para el progreso de las pequeñas empresas. Actualmente la fundación está dedicada al ciento por ciento a productos para la guerra. Pero su director expresa libremente sus previsiones para el futuro. Entre ellas, la 'cocina por radio', una suerte de consecuencia lógica de la diatermia y el tratamiento por 'fiebre artificial'. Según profetiza, la cocina por medios electrónicos será una práctica comercial generalizada, pero duda de su aplicación doméstica a causa de los peligros de la alta tensión. Una firma comercial ha perfeccionado ya una máquina radiotérmica expendedora de hamburguesas y perros calientes. El cliente introduce una moneda por una ranura y, al cabo de medio minuto, le sale un bocadillo radiococinado.»

«Recientemente, el doctor James Hiller, de los Laboratorios RCA, anunció el desarrollo provisional de un instrumento fundamental al cual dio el nombre de microanalizador electrónico. Según sus palabras, tiene por misión analizar zonas de pequeñísimas dimensiones en muestras para microscopio electrónico. Merced a este instrumento, el usuario puede estudiar muestras que ya son tan microscópicas que deben ampliarse millares de veces para que puedan observarse sus detalles. Así, posibilita elegir una determinada zona, y acaso una partícula, de un diámetro del orden de las diezmilésimas de milímetro y un peso del orden de las milbillonésimas de gramo, y determinar qué elementos químicos contiene esa zona o partícula submicroscópica.»

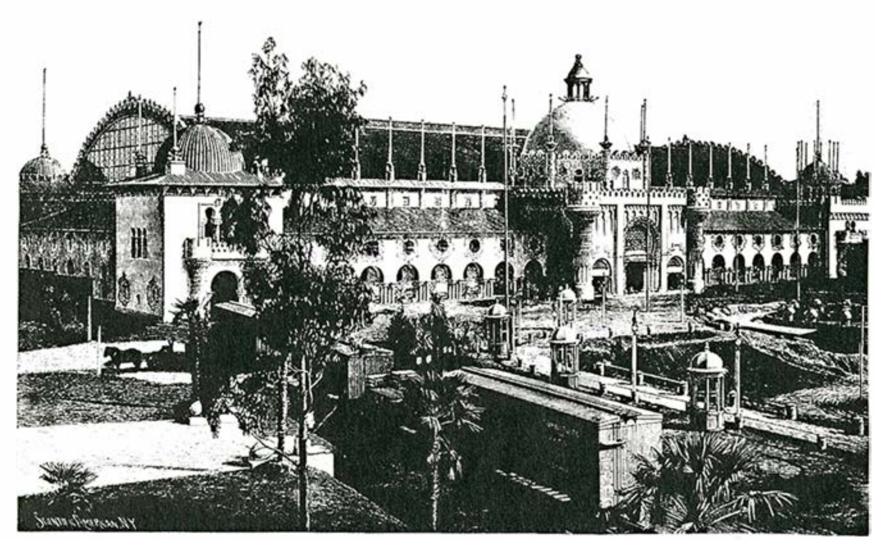
«Aunque la guerra haya sido la ocasión de múltiples invenciones, ha añadido poca cosa al acervo mundial de conocimientos fundamentales, según expresaba recientemente el doctor Frank B. Jewett, vicepresidente de la Compañía Americana de Teléfonos y Telégrafos, ante los miembros del Instituto Universitario de Nueva York para la Reconstrucción Posbélica. El progreso en ciertos campos, afirmó, ha sido a expensas de un cese virtual del trabajo investigador en otros no considerados esenciales para la logística de la guerra.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «La aplicación de la electricidad a usos domésticos ha avanzado bastante más allá de la etapa experimental, salvo en el capítulo de la iluminación; pero se ha trabajado lo suficiente para mostrar qué sucederá cuando las casas dispongan de calefacción eléctrica. Llegado ese momento, bastará con pulsar un interruptor. En lo que respecta a la cocina, ya se han ideado un gran número de útiles que sólo esperan que la corriente se abarate para que puedan aprovecharse plenamente. De una dama neoyorquina se dice que dispone de tales artefactos que le permiten, antes de levantarse de la cama, encender fuego en la cocina conectando la corriente; luego, cuando baja, encuentra la tetera hirviendo y el lugar agradablemente cálido.—*Chamber's Journal*.»

«El doctor J. M. Macfarlane ha demostrado que las hojas de la dionea no reaccionan a un simple contacto. Debe haber un segundo estímulo para que trate de cerrarse. Pero, incluso así, ha de mediar un intervalo de casi un minuto. Si los estímulos son muy próximos, no se produce la reacción. La ventaja del intervalo podría ser que ofrece un procedimiento para descubrir si lo que se posa en la superficie de la hoja es comestible o no. Por ejemplo, un guijo podría rebotar y los estímulos ser muy cercanos. Un insecto esperaría un corto tiempo para centrar sus sentidos y formular un plan de huida antes de luchar para librarse. El descubrimiento del doctor Macfarlane es la más maravillosa de todas las maravillas que se hayan descubierto en la conducta de las plantas. —*The Independent*.»

«La Feria de Invierno, una muestra internacional, fue inaugurada el 27 de enero de 1894 y ocupa una superficie de unas 65 hectáreas del Parque Golden Gate de San Francisco. El Pabellón de las Manufacturas y Artes Liberales, que se recoge en la ilustración, es probablemente la construcción que primero llama la atención. La gran cúpula azul con su linterna dorada reluce contrastando con el azul intenso del cielo semitropical cual una inmensa joya, mientras que las tejas gris verdosas ofrecen una peculiar sensación de antigüedad. El edificio es la mayor estructura de la Feria y en su interior exponen treinta y seis países. Estados Unidos está bien representado.»



Pabellón de las Manufacturas y Artes Liberales en la Feria de Invierno

Comunidades prehispánicas de Baja California

Las pinturas rupestres de las cuevas y abrigos de Baja California (México) muestran una serie de rasgos propios de sociedades cazadoras-recolectoras

J. M. Fullola, M. M. Bergadà, V. del Castillo, M. A. Petit y A. Rubio

Entre los efectos tectónicos más espectaculares producidos por la falla de San Andrés se cuenta la península de Baja California. Situada en el noroeste mexicano, entre los paralelos 22º 52′ y 32º 30′ y los meridianos 109 y 117, se adentra en el océano Pacífico, cerrando el golfo de California. De norte a sur la atraviesa una serranía, que le confiere unidad orográfica y se fragmenta en diferentes sierras de origen volcánico y, algunas, de composición granítica.

El clima comprende tipos áridos, subáridos y desérticos, con temperaturas máximas de 44º C y mínimas de 0º C. Cuando llega la temporada de lluvias, se forman grandes tormentas y chubascos que ponen en funcionamiento los arroyos que desembocan en ambas costas. A tan duras condiciones corresponde una vegetación arbustiva, de tallo craso, con predominio de cactáceas como chollas, biznagas, pitahayas y yucas, y ciertos endemismos, así el cirio (*Idria columnaris*).

Ese tapiz vegetal sirve para alimentar venados (*Odocideus hemionus*), borregos (*Ovis canadensis*) y berrendos (*Antilocapra americana*). Medran carnívoros, como el puma (*Felis concolor*), el gato montés (*Felis rufus*) y el coyote (*Canis latrans*). Entre las aves son característicos el buitre o zopilote (*Cathartes aura*) y el pelícano (*Pelecanus occidentalis*). Tanto el golfo de California como la costa peninsular del Pacífico albergan una variada fauna marina, que incluye cetáceos y pinnípedos. Todas estas especies están representadas en las pinturas rupestres de las sierras bajocalifornianas, realizadas en diversas épocas por los hombres que habitaban en la región.

La colonización europea de esta región fue tardía. Aunque los primeros intentos de ocupación se dieron en el siglo XVI, será en las postrimerías del XVII cuando converjan los intereses de la corona española y los afanes de la Compañía de Jesús: aquélla necesita encontrar la vía comercial del océano Pacífico y a ésta le mueve el deseo de establecer misiones. En 1697 los jesuitas obtienen la licencia del virrey de Nueva España para colonizar Baja California; ese mismo año el padre Juan M.ª Salvatierra funda la primera misión en Loreto.

Durante el período misional jesuita (1697-1767), los religiosos redactaron numerosos informes, cartas y crónicas, publicadas en Europa con posterioridad a la expulsión, por Carlos III, de la Compañía de los dominios de la corona. Estos relatos constituyen una valiosa fuente de información etnográfica e histórica sobre la población indígena de la Baja California que ellos conocieron.

Las crónicas hablan de tres grupos lingüísticos, de norte a sur: cochimís, guaycuras y pericús. De estas poblaciones cazadoras-recolectoras nómadas recogieron datos relativos a su cultura material, costumbres y religión. También llegó al conocimiento de los misioneros la existencia de rastros de una antigua población, que según la tradición indígena estaba constituida por gigantes procedentes del norte. Este relato pareció confirmarse con el hallazgo de restos óseos de gran tamaño, que creyeron humanos, cerca de San Joaquín, y por la existencia de cuevas con pinturas situadas en zonas muy elevadas. Por la crónica de Miguel del Barco sabemos que el padre Joseph Rothea se mostró escéptico sobre la existencia de estos gigantes y negó, asimismo, que hubiera ninguna filiación cultural entre los autores de las pinturas en cuevas y los indios del siglo XVIII.

Hasta finales del XIX no volvemos a encontrar referencias escritas sobre la antigua población peninsular. En 1884, el investigador holandés H. F. Ten Kate daba cuenta de la existencia de restos humanos pintados de rojo en la región pericú, situada, al sur, entre La Paz y Todos Santos; Ten Kate resaltaba las características melanesias de los esqueletos exhumados. Estos datos fueron retomados por el antropólogo Paul Rivet para construir su tesis sobre

JOSEP M. FULLOLA, M.ª MERCE BERGADA, M.ª VICTORIA DEL CASTILLO, M.ª ANGELS PETIT y ALBERT RUBIO conforman parte del equipo de investigación de la Universidad de Barcelona en la prehistoria de Baja California. Fullola, catedrático de prehistoria de la Universidad de Barcelona y director del Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques (SERP), ha centrado su interés en el estudio de los pueblos cazadores-recolectores a partir de una investigación interdisciplinar que se vertebra en torno al SERP. Bergadà trabaja en aspectos sedimentológicos de la prehistoria. Del Castillo, prehistoriadora, y Rubio, antropólogo, están preparando sus tesis doctorales en arte rupestre. Petit es profesora titular de la universidad barcelonesa y ha orientado su investigación hacia los primeros grupos productores de la prehistoria.

1. CUEVA PINTADA en la sierra de San Francisco, en la zona central de Baja California. Se trata de los frisos más significativos del arte rupestre prehistórico bajocaliforniano. Los grupos que vivieron en dicha parte del continente hasta la llegada estable de los españoles tenían una economía basada en la caza, la pesca y la recolección. Eran nómadas y desconocían la agricultura, la ganadería y la cerámica.

antiguas migraciones transpacíficas llegadas al continente americano.

Por aquel entonces, el químico francés Leon Diguet, que trabajaba en la explotación cuprífera de El Boleo en Santa Rosalía, exploró la región central de Baja California, reseñó la presencia de cuevas con pinturas y recogió material arqueológico. Sus trabajos culminaron en una misión científica organizada por el Musée de l'Homme de París, que obtuvo importantes resultados en antropología física y describió, entre otras, las pinturas de San Borjitas (en la sierra de Guadalupe) y Palmarito (en la sierra de San Francisco).

En los años cuarenta de nuestro siglo, W. Massey excavó la zona sureña de Los Cabos. Se centró en el mundo funerario y siguió los trabajos iniciados por Ten Kate y Diguet. Halló enterramientos secundarios, es decir, aquellos en los que el esqueleto no conservaba su articulación anatómica, sino que los restos habían llegado allí desmembrados intencionadamente; a veces aparecían cubiertos con pigmentos naturales. Se descubrió una sepultura primaria, es decir, un enterramiento en conexión anatómica.

Las excavaciones emprendidas en el área comondú, en el centro de la península, dieron como resultado la definición de una cultura del mismo nombre, que se desarrolló entre el 500 a. C. y el 1820 d. C.; bajo esta denominación se englobaban tanto los cochimís del momento del contacto con los europeos, como sus antepasados. Años más tarde, D. R. Tuohy, recogió en una tesis los datos procedentes de las cuevas de Caguama, Parraguirre, Metate y Pilón, excavadas por W. Massey y por él mismo; en este trabajo define la cultura material propia de la denominada por W. Massey "cultura comondú".

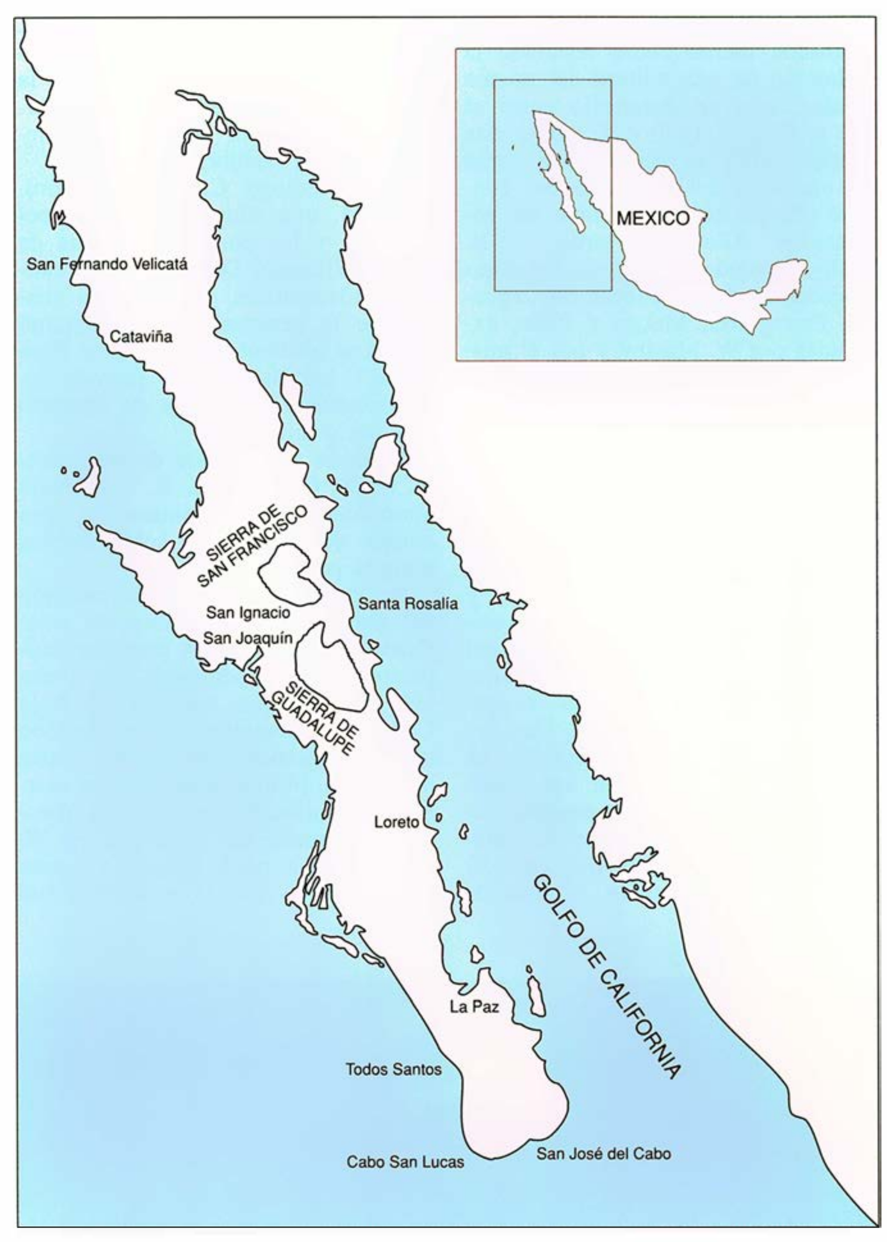
Sin salirnos del área central, en 1951, B. Dahlgren y J. Romero, del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, estudiaron el mural pintado de San Borjitas y realizaron siete sondeos en el sedimento de la cueva. Su principal aportación fue establecer una tipología elemental sobre las representaciones humanas. En los años sesenta, C. W. Meighan intervino en Cueva Pintada (sierra de San Francisco), donde recogió materiales arqueológicos de superficie; la datación por radiocarbono fijó en 530 años, antes del presente, la edad de los restos vegetales encontrados. Meighan consideró que esta fecha ofrecía un indicador correcto de la edad de los murales pintados, interpretados como un elemento característico de la "cultura comondú".

El arqueólogo C. Grant elaboró, en 1974, una síntesis sobre los petroglifos y las pinturas rupestres de Baja California. Distinguió dos estilos fundamentales para la zona central de la península, que denominó "cochimí abstracto" y "cochimí figurativo"; los situó en el período inmediatamente anterior y de contacto con los jesuitas.

También a mediados de los setenta, H. W. Crosby y E. R. Hambleton aportaban, independientemente, una amplia documentación sobre nuevos abrigos con pinturas.

No puede deslindarse la cuestión del poblamiento del continente americano del tema de las primeras ocupaciones de la península. La fecha más antigua que tenemos en Baja California, obtenida por el método del radiocarbono, lo remonta hasta hace unos 14.610 años, con un margen de variación de 270. La datación, realizada en 1976 por E. W. Ritter en la zona de Laguna Chapala (en la región central), concuerda con





2. PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA, situada en el noroeste mexicano, entre los paralelos 22° 52′ y 32° 30′ y los meridianos 109 y 117; se adentra en el océano Pacífico, cerrando el golfo de California. De norte a sur la atraviesa una serranía, que le confiere unidad orográfica y se fragmenta en diferentes sierras de origen volcánico y, algunas, de composición granítica. El clima comprende tipos áridos, subáridos y desérticos, con temperaturas máximas de 44° C y mínimas de 0° C.

la hipótesis según la cual el *Homo sapiens sapiens* llegó a América, a través de Bering, hace unos 30.000 años, durante la segunda mitad de la última glaciación, la de Wisconsin.

En el área costera nororiental de la península se sitúa Cueva Baldwin. Se han podido obtener en ella, por análisis del carbono 14, cinco fechas de ocupación que indican una instalación humana esporádica, no continua, desde hace unos 10.900 años hasta el presente.

De todos estos datos sueltos se ha deducido que el primer poblamiento generalizado de la península se produce hacia el 500 a. C., cuando se inicia la cultura comondú. No se conocen con precisión las notas distintivas de dicha cultura, por cuyo motivo se ha convertido, en muchas ocasiones, en cajón de sastre donde iba a parar todo lo anterior a la llegada de los españoles a la península. Se admite que en torno a esa fecha se producen las penetraciones de grupos de lengua yuma, procedentes del suroeste de los Estados Unidos; los yumas arrinconan en el extremo sur de Baja California a las tribus de pericús y guaycuras.

Nuestro equipo de la Universidad de Barcelona ha venido realizando, desde 1990, excavaciones arqueológicas de los yacimientos de La Cueva, arroyo de San Gregorio y cueva del Ratón, en la sierra de San Francisco. En el yacimiento de La Cueva encontramos indicios de habitación de hace unos 200 años, es decir, en torno al momento de contacto de los indígenas con los primeros europeos. Los lugares de habitación se encuentran bajo los grandes abrigos que se abren en las escarpadas laderas de las sierras y en campamentos al aire libre.

La falta de suficientes excavaciones arqueológicas en extensión no permite todavía conocer la intensidad y la funcionalidad de la ocupación de dichos asentamientos. En nuestras excavaciones en la cueva del Ratón hemos identificado, por primera vez, diversas estructuras de combustión, fechadas entre los siglos XIII y XVI, que atestiguan una ocupación continuada o repetida dentro de un abrigo con pinturas.

Los grupos que vivieron en Baja California hasta la llegada estable de los españoles tenían una economía basada en la caza, la pesca y la recolección. Eran nómadas y desconocían la agricultura, la ganadería y la cerámica. La geología volcánica de la zona aportaba la materia prima para confeccionar las armas de caza. Fabricaron sus útiles de obsidiana o basalto. A veces se servían también del sílex. De basalto eran raederas y desfibradores; de obsidiana, las puntas de proyectil. Tenían éstas formas muy diversas: denticuladas, de base cóncava, de aletas y pedúnculo y otras; se lograban casi siempre mediante un retoque plano, en peladura, hecho por presión y no por percusión.

Estaban también tallados en piedra los metates o molinos de mano, cuyo uso ha perdurado hasta nuestros días. Aparecen en abrigos y cuevas, con su superficie ahuecada y pulida, en ocasiones con la “mano” o parte móvil en posición. Los metates servían para moler los colorantes, normalmente óxidos de hierro, destinados a las pinturas.

Abundan menos los útiles fabricados en hueso, tales como punzones, leznas para cestería y agujas para coser pieles. Estos huesos procedían de ovicápridos y cérvidos, frecuentes en el entorno. De sus restos hemos hallado pruebas en las excavaciones, sobre todo alrededor y en el interior de las estructuras de combustión u hogares, lo que confirma su aprovechamiento alimentario.

Reviste interés la abundante pre-

sencia de conchas marinas en los yacimientos de la sierra, a varias decenas de kilómetros de la costa. Se trata de especies de aguas cálidas, como el *Lyropecten subnudosus* o el *Laevicardium elatum*, procedentes de ambas costas peninsulares. Aparecen también opérculos pertenecientes a caracoles marinos, pero sueltos; no hemos hallado univalvos. De ello podría inferirse algún tipo de uso de estos opérculos, quizá como valor de intercambio. Las conchas marinas recuperadas en las sierras interiores podrían cumplir esa misma función transaccional, y de prestigio, entre grupos nómadas que debían desplazarse en un amplio territorio que comprendería zonas costeras y áreas interiores.

Las condiciones climáticas de la zona, con calor y ambiente muy seco, han favorecido la conservación de útiles perecederos de materia vegetal: puntas de proyectil muy aguzadas, redes, cuerdas, sandalias y cestería; se han recogido también ramas cortadas, palos de mayor o menor longitud o largas espinas de plantas como la biznaga.

La península de Baja California es un lugar excepcional para el estudio de las manifestaciones rupestres de los pueblos cazadores-recolectores pintadas y grabadas, debido tanto al número de estaciones con este tipo de elementos culturales —más de trescientas localizadas hasta el momento— como por la singularidad de su expresión.

En cuanto a los grabados, éstos se pueden encontrar tanto en extensas acumulaciones de bloques basálticos como en los abrigos donde también existen manifestaciones pictográficas. Ejemplos del primer caso son la Cuesta del Soldado (sierra de San Francisco), Piedras Pintas (sierra de Guadalupe) o San Fernando de Velicatá (cerca de la población de El Progreso); se trata de motivos realizados con las técnicas de piqueteado, incisión o abrasión, que comprenden distintos diseños figurativos y abstractos. Cuando encontramos grabados en cuevas con pinturas —por ejemplo en San Borjitas y El Pilo (sierra de Guadalupe) o El Batequi (sierra de San Francisco)— no suelen repetir la representación pictórica, sino que la complementan con diseños de naturaleza sexual —como las vulvas— y con distintos tipos de rayados y punteados.

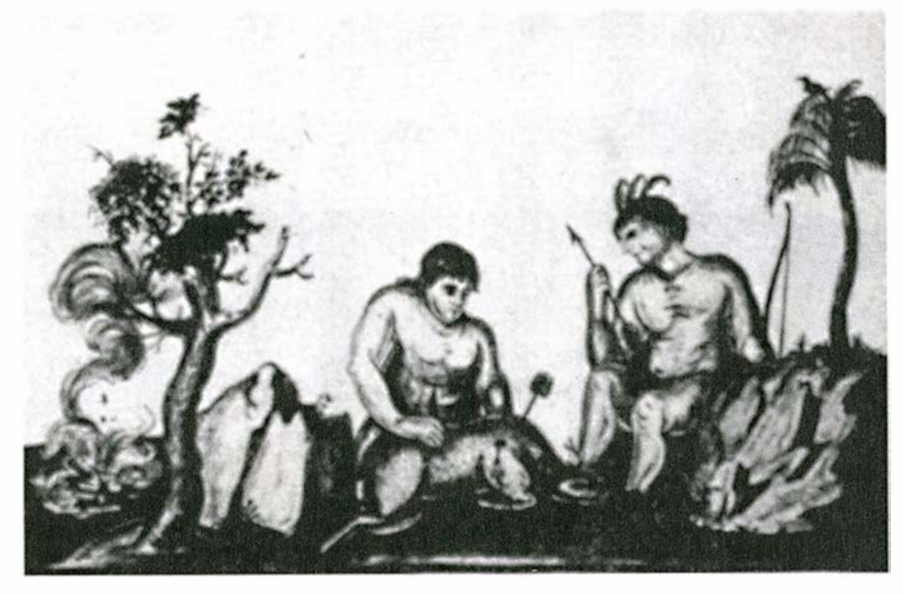
Las pinturas de Baja California presentan un rasgo distintivo. Si bien por toda la península se extienden unos estilos esquemáticos y abstractos similares a los que se observan en el suroeste de Estados Unidos, en las sierras centrales se desarrollaron los "Grandes Murales", caso único en la pintura rupestre americana.

En los arroyos y cañadas de las sierras de Guadalupe y San Francisco se encuentran diferentes tipos de abrigos, oquedades y respaldos que actúan de soporte de los murales, sin que ninguna norma de orientación, tamaño o forma parezca regir la elección de los lugares pintados. Podemos hallar, pues, pinturas lo mismo en pequeñas covachas que en grandes cavidades, donde las figuras adornan un techo distante varios metros del suelo. Hay cuevas que fueron profusamente utilizadas por los pintores; algunas contienen cientos de figuras y presentan innumerables superposiciones que las convierten en auténticos palimpsestos.

En estos paneles se observa un largo proceso pictográfico. Muestran representaciones de elementos figurativos y abstractos; entre los primeros aparecen figuras humanas y animales terrestres y marinos, y, entre los se-



3. GRABADOS RUPESTRES de El Coyote, en la sierra de Guadalupe. Pueden apreciarse tres figuras humanas y un ciervo. Se han realizado con las técnicas del piqueteado y rayado. (Fotografía de A. Rubio.)



4. INDIGENAS CAZANDO UN VENADO, según un dibujo realizado por el misionero jesuita Ignacio Tirsch. En 1697 el padre Juan M.ª Salvatierra funda la primera misión en Loreto. Durante el período misional jesuita (1697-1767), los religiosos redactaron numerosos informes, cartas y crónicas, que constituyen una valiosa fuente de información etnográfica e histórica sobre la población indígena de la Baja California que ellos conocieron.

gundos, barras, puntos, dibujos esteliformes y ramiformes. Se trata de figuras que oscilan entre un tamaño de pocos centímetros y otras cuyas dimensiones se representan a escala igual o superior a la real.

Los colores, de origen mineral, comprenden el blanco, el negro y distintas tonalidades de rojos, castaños y ocres. Aunque existen figuras monocromas, frecuentemente se representan muchas de ellas en varios colores. Las técnicas básicas se centran en la tinta plana, el silueteado, el rayado y el punteado, que al combinarse entre sí dan lugar a distintos tipos de diseños.

Si bien podemos entender que estas son las características comunes a las pinturas rupestres de las sierras centrales de Baja California, hemos observado diferentes particularidades que obligan a distinguir las pictografías de la sierra de San Francisco de las de la sierra de Guadalupe.

Las figuras humanas de la sierra de San Francisco aparecen en posición frontal, en actitud estática, con los brazos levantados marcando el ángulo de los codos —a modo de posición orante—; hay casos excepcionales en posición inclinada, invertida y horizontal. Su cabeza es redondeada, sin cuello, apoyada en un tronco compacto y uniforme; las manos están abiertas, mostrando la palma y los dedos; los pies, de perfil, también enseñan dedos y planta. Las figuras femeninas se distinguen por la presencia de los senos de perfil situados debajo de las axilas, único elemento que las diferencia de las masculinas; sólo en algunas figuras, especialmente las de diseño más esquemático, se representa el sexo masculino.

Según la técnica y el estilo de las representaciones humanas, distinguimos cinco tipos básicos: *a*) grandes figuras, de hasta dos metros de altura, de cuerpo compacto, con rasgos naturalistas y pintadas con uno o dos colores; *b*) figuras bicolores, también de gran tamaño —aunque algo menores que las anteriores—, divididas vertical u horizontalmente; *c*) figuras pequeñas, de rasgos estilizados y esquemáticos, generalmente de un solo color y perfiladas en blanco; *d*) figuras proporcionadas de mediano tamaño, con una anatomía más detallada, biseccionadas en rojo y negro y perfiladas en blanco, y *e*) figuras de mediano y pequeño tamaño, de estilo esquemático a un solo color.

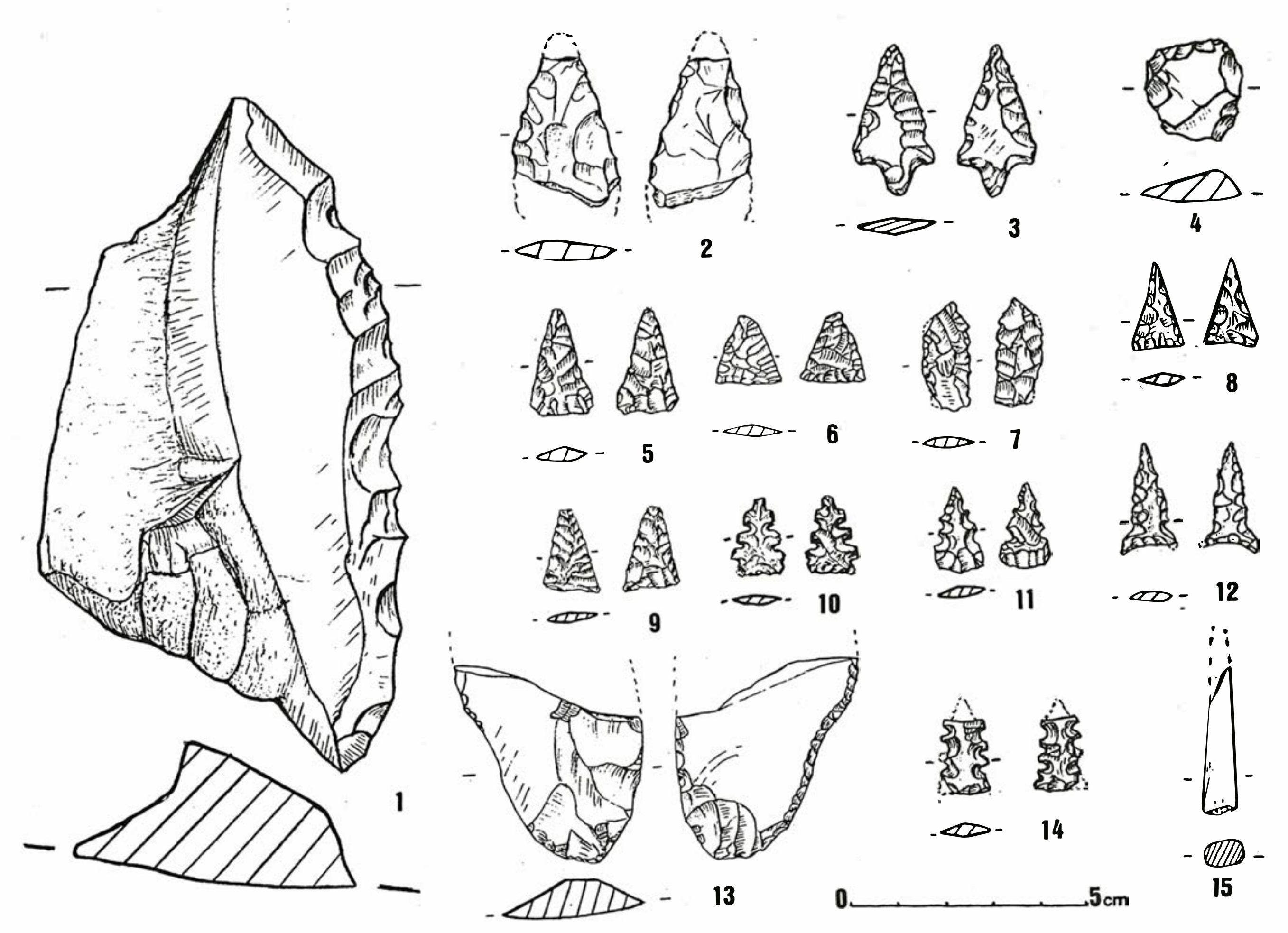
El análisis de las superposiciones de los murales en dos de estas cuevas, La Soledad y La Palma, nos lleva a defender el carácter secuencial de estos estilos en el tiempo: las grandes figuras monocromas pertenecen a fases más antiguas, seguidas por las figuras bicolores de mediano y gran tamaño y, por último, las figuras menores y esquemáticas.

Merece destacarse la atención que ponían en los tocados de ciertos sujetos, identificados, sin base suficiente, por R. Smith con los brujos o *guamas* descritos por los primeros misioneros. Otro rasgo de interés son las flechas o lanzas que atraviesan muchas figuras; algunas muestran la emplumadura y puntas de tipo triangular. La existencia de figuras flechadas nos acerca a la presencia del concepto de sacrificio en pueblos de tradición cultural cazadora-recolectora.

Se incluyen figuras animales en casi todas las composiciones. Abundan berrendos, carneros y cérvidos —estos últimos presentes en la ma-



5. PARTE DEL MURAL de la Cueva de la Soledad, en la sierra de San Francisco. Destacan las representaciones humanas y de animales. El proceso de superposiciones que se percibe, estudiado por Ramón Viñas y Elisa Sarriá, del equipo de trabajo de los autores, da fe de las diferentes etapas en que se realizó el mural.



6. ELEMENTOS LITICOS Y OSEOS de la Cueva, en el arroyo de San Gregorio, de la sierra de San Francisco. Se han representado una raedera de basalto (*1*) y otra de obsidiana (*13*), varias puntas de proyectil de obsidiana (*2*, *5-12* y *14*), una punta de flecha (*3*), un raspador de obsidiana (*4*) y un fragmento de punzón de hueso (*15*).

yoría de las cavidades—; les siguen pumas, coyotes, aves, serpientes, ballenas, tortugas, leones marinos y otros. En cuanto a técnica y estilo se sigue la pauta de las figuras humanas, pero contrastan con ellas por su dinamismo; este rasgo, acentuado en los ungulados, desaparece en los carnívoros.

La forma de representación varía según las especies: los mamíferos muestran el cuerpo y la cabeza de perfil, con las orejas una encima de otra y la boca abierta; las cornamentas se observan en perspectiva oblicua, con un asta hacia delante y otra hacia atrás. Entre los herbívoros destaca la representación de las pezuñas bisulcas en posición frontal, con los calcañares uno a cada lado de la extremidad. (Se repite la misma pauta en el dibujo frontal de las plantas de los pies de las figuras humanas.) Pelícanos, buitres y cuervos, como las demás aves, aparecen con las alas abiertas, la cabeza de perfil y el pico abierto. En algunos peces se advierte una metamorfosis parcial, con rasgos de otros animales e incluso humanos.

Todas las figuras, menos las representativas de carnívoros, pueden estar flechadas o lanceadas; esa salvedad, unida a su característica posición estática y al hecho de que generalmente son de color negro, nos demuestra que los carnívoros debían tener algún significado especial, que no acertamos a identificar. Asimismo, llama también la atención la escasa presencia de los ofidios; aunque hay una composición que sobresale por su espectacularidad: la de la Cueva de la Serpiente, donde un reptil, de cuatro metros de longitud, aparece con cuerpo de serpiente, cabeza de ciervo y cola de animal marino, está rodeado de figuras antropomorfas y se enfrenta a otro similar. Se repiten varias características; por ejemplo, la posición vertical de venados de pequeño tamaño o algunas asociaciones de animales que aparecen enfrentados, en recua o entrecruzados.

El conjunto de figuras abstractas permanece a lo largo de todo el proceso pictográfico. Lo forman estructuras ovaladas y cuadrangulares, esteliformes, círculos, espirales, barras, puntos, trazos ramiformes y cruces. Pueden estar realizadas en tinta plana, con varios colores o silueteadas. En muchas ocasiones se asocian a figuras animales o humanas. Para algunos autores, podrían encerrar significación astronómica, como indicadores de solsticios o cuerpos celestes.

Los investigadores no han prestado la misma atención a la sierra de Guadalupe. Nuestro equipo ha iniciado recientemente las primeras campañas de trabajo de campo en esta zona. Pero ya podemos avanzar que la región norte de la sierra comparte técnicas y estilos con la de San Francisco, mientras que la región sur tiene sus propias peculiaridades. En ambos sectores, volvemos a encontrar figuras humanas, animales y elementos abstractos.

Por lo que se refiere a las figuras humanas, se aprecian técnicas y estilos diversos. Aparecen figuras de gran tamaño, de cabeza redonda y

con los brazos y las piernas abiertos, a veces con la representación de los órganos sexuales; en este último caso la técnica empleada es el silueteado y la compartimentación interior del cuerpo en cuadros. Se dan también figuras divididas verticalmente con dos tintas planas y otras a un solo color. En esas diferencias se fundó B. Dahlgren para establecer la clasificación tipológica de la cueva de San Borjitas, situada en el área septentrional de Guadalupe, próxima a la sierra de San Francisco. Distinguió cuatro fases que corresponderían a una misma cultura; en su opinión, las figuras silueteadas serían las más antiguas y, las bicolores, las más recientes.

Un rasgo peculiar de esta zona es la representación de manos y pies, en grupos o aislados; las manos se realizan tanto en positivo como en negativo. En muchas ocasiones constituyen la impronta de manos infantiles, indicio probable de una relación con rituales en donde participaban niños o adolescentes.

Las posiciones de la figura humana son también estáticas, aunque de forma excepcional se han pintado personajes con las piernas y pies de perfil, produciendo una sensación de movimiento. Los tocados que cubren las cabezas no alcanzan la variedad de los vistos en la sierra de San Francisco.

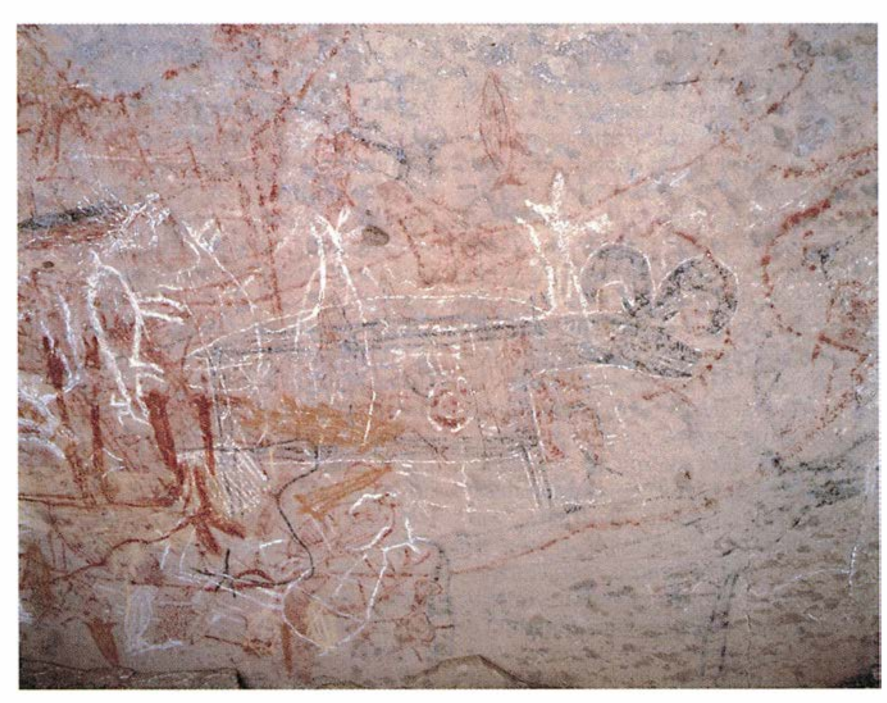
Son frecuentes las representaciones flechadas; algunas figuras aparecen atravesadas por más de una docena de flechas. L. Diguet interpretó el mural de San Borjitas como una escena de guerra; para nosotros se trataría de la representación de sacrificios humanos, hipótesis que basamos en la ausencia de bandos en la composición.

Las figuras de animales comprenden especies terrestres y marinas. Entre las primeras predominan los cérvidos; entre las segundas, los peces. Y es motivo habitual el zopilote. De su técnica y estilo podemos repetir lo expuesto a propósito de la figura humana, con una novedad: el silueteado de la cabeza y el cuello de herbívoros de mediano tamaño, a un solo color. Lo mismo que en San Francisco, los animales presentan a menudo proyectiles clavados en el cuerpo. Se hacen ahora más habituales los motivos abstractos.

En resumen, en la sierra de Guadalupe predomina el uso del silueteado y, en la de San Francisco, la utilización de las tintas planas, amén de ofrecer una mayor diversidad de especies animales, sobre todo marinas.

Algunos atribuyen el arte rupestre del centro de Baja California a la cultura aborigen en la época del contacto, es decir, a los cochimís descritos por los misioneros jesuitas y sus inmediatos antecesores. La división de C. Grant entre "arte cochimí abstracto" y "arte cochimí figurativo" concede a una misma cultura dos estilos diferentes, sin aportar ningún dato que avale tal hipótesis. La idea de una "cultura cochimí" se debe a los misioneros del siglo XVIII, fundados en la identidad lingüística, sin atender a otros rasgos del grupo. Pero la asignación de ese arte rupestre a la cultura "comondú" tampoco resulta adecuada: abarca muchos estilos en una misma cultura sin demostrar esta filiación uniformadora.

Nosotros, por contra, creemos que el proceso de realización de los murales es bastante largo y sólo se interrumpe con la llegada de los europeos a la península. Basándonos en las superposiciones, podemos inferir que las últimas fases, correspondientes a figuras de pequeño tamaño y de rasgos más esquemáticos, son los que se pueden atribuir a los últimos indígenas prehispánicos; el proceso de desaparición de las grandes figuras había ya culminado antes de la invasión europea. Y si admitimos que las transformaciones culturales no se producen por cortes bruscos, sino a través de procesos prolongados en los que perduran muchos elementos, parece obvio que los últimos indios bajocalifornianos participaran de un sustrato cultural no sólo de larga tradición en la península, sino también relacionado con todo el suroeste norteamericano.



7. PINTURAS DE LA CUEVA DEL DIPUGON, en la sierra de Guadalupe. Las representaciones de las cuevas de dicha zona se caracterizan por su esquematismo y por el predominio del silueteado. (Fotografía de R. Viñas.)

Para conocer el modo de vida y evolución cultural en la prehistoria bajocaliforniana, hemos de completar el análisis de las fases pictográficas y su distribución espacial con otros datos del registro arqueológico. Nos dicen éstos que se trata de poblaciones de cazadores-recolectores, muy familiarizados con los recursos marinos de su entorno. A juzgar por la riqueza de sus manifestaciones gráficas, tienen una vida social compleja, que les ha permitido dedicar un esfuerzo importante a la realización de los frisos pintados, para los cuales, en ocasiones, han tenido que utilizar grandes andamios. Además de saber explotar bien su entorno, las poblaciones tenían su propia explicación de los fenómenos celestes y practicaban sacrificios humanos.

¿Qué función cumplían estas cuevas pintadas y qué significado se les puede atribuir? Según R. Heizer y M. Baumhoff, las explicaciones deben buscarse en ritos de magia, especialmente venatoria. Para K. Hedges poseerían un carácter shamánico propio, aunque vinculado con sistemas religiosos dominantes en los pueblos cazadores-recolectores. P. Schaafsma sostiene, por su lado, que



8. EXCAVACION ARQUEOLOGICA en el yacimiento de la Cueva. La exhumación cuidadosa de los restos materiales constituye una de las tareas más delicadas del trabajo de campo.

en cada lugar cambia el uso y función de las pinturas.

Para nosotros, en la interpretación de ese arte rupestre deben converger varios factores. La cantidad y disparidad de cuevas, unidas a la coherencia de sus estructuras representativas, muestran el arte rupestre como un sistema de comunicación complejo con elementos relacionados con la magia, el shamanismo y una teoría del mundo. Nos encontramos ante un universo mítico muy complejo. Los sacrificios rituales, la ideación de seres fantásticos, las representaciones astronómicas y otras nos muestran una imaginería susceptible de ser estudiada a partir de su propia estructuración temática y formal. Por otra parte, nos encontramos ante una exposición de mitogramas entendidos tal como los define A. Leroi Gourhan, un "enunciado de símbolos sostenidos por el ritmo de la disposición plástica, animados por el discurso". Si bien hemos perdido la tradición oral que sustenta ese discurso, un conocimiento etnohistórico y arqueológico de culturas prehispánicas americanas puede acercarnos a estos referentes mitológicos.

¿Por qué unas comunidades cazadoras-recolectoras que no sufrieron cambios técnicos y económicos importantes a lo largo de mucho tiempo, en un momento y lugar muy precisos desarrollaron un arte espléndido que no perduró? Un fenómeno, por lo demás, que se repite en la historia de los grupos de cazadores-recolectores.

Las sociedades que generaron este arte en Baja California tuvieron que sufrir, sin duda, una transformación interna o intergrupal que debió de afectar profundamente a su organización social y, por ende, a la ideología unificadora subyacente. Intervendría, además, la inmigración de otros grupos extrapeninsulares, en particular las de los pueblos de habla yuma, y es posible que el desarrollo del arte rupestre debiera algo a la sustitución del propulsor por el arco y la flecha, documentada en el área del suroeste norteamericano a mediados del primer milenio a. C. Son cuestiones que debe resolver la arqueología. Pero quizá lo más apremiante sea el fijar la secuencia cronológica y cultural que vertebró la historia de estas comunidades.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ROCK ART OF BAJA CALIFORNIA, NOTES ON THE PICTOGRAPHS OF BAJA CALIFORNIA BY LEON DIGUET (1895). C. Grant, 135 páginas, Dawson's Book Shop, Los Angeles, California, 1974.

LA PINTURA RUPESTRE DE BAJA CALIFORNIA. E. Hambleton, 157 págs., Fondo de Cultura Banamex, México, 1979.

THE CAVE PAINTINGS OF BAJA CALIFORNIA. H. W. Crosby, 189 págs., The Copley Press, Inc., La Jolla, California, 1984.

"REPERTORIO TEMÁTICO DE LA PINTURA RUPESTRE DE LA SIERRA DE SAN FRANCISCO, BAJA CALIFORNIA (MÉXICO)". R. Viñas, E. Rubio, A. y V. del Castillo, páginas 201-232, Ars Praehistorica, t. III/IV, Sabadell, 1984/1985.

HISTORIA NATURAL Y CRÓNICA DE LA ANTIGUA CALIFORNIA. M. del Barco, U.N.A.M., 482 páginas, México, 1988 (original 1773-1780?).

Espejos líquidos

Está abierta la puerta a la construcción de telescopios gigantescos para ver más lejos que nunca gracias a los espejos de mercurio líquido muy ligeros, cuyo tamaño podría superar, en mucho, el de los espejos de cristal

Ermanno F. Borra

Durante casi cuatro siglos, los telescopios reflectores han venido recogiendo la vacilante luz procedente de millones y millones de estrellas y galaxias. Nos han descubierto un universo vasto y complejo; han ensanchado nuestro mundo y nuestra imaginación. Sin embargo, pese a todos sus logros, el reflector clásico tiene serias limitaciones. Es muy caro. A menudo resulta casi imposible bruñir y pulir una gran superficie de cristal hasta conseguir una parábola perfecta, la forma ideal que concentra en un punto rayos de luz paralelos. Los espejos se deforman con los cambios de temperatura y, superado cierto tamaño, tienden a abombarse bajo su propio peso.

Por ello, de vez en cuando, astrónomos y ópticos se acuerdan de una vieja rareza: el espejo líquido. No puede hundirse, así que cabe hacerlo tan grande como se quiera. Además, darle forma parabólica a un líquido es muy sencillo; el tirón de las fuerzas de la gravedad y centrífuga hace que la superficie de un líquido reflectante —mercurio, por ejemplo— en rotación forme una parábola perfecta. Este fenómeno, que se produce también al remover el café, ofrece una superficie óptica perfecta que no precisa ser pulida. En consecuencia, el coste de los espejos líquidos podría ser mucho menor que el de los espejos de cristal. Además, como la óptica adquiere tanto interés en la mayoría de las mediciones científicas, los espejos líquidos también podrían ser de utilidad en numerosos campos de la investigación y la ingeniería.

No se sabe a quién se le ocurrió crear un espejo líquido. Podría haber sido el propio Newton, que inventó el telescopio reflector y sabía que la superficie de un cubo de agua que gira adopta una forma parabólica. Pero la idea no se abordó en serio hasta comienzos de este siglo, cuando Robert W. Wood, de la Universidad Johns Hopkins, intentó construir un telescopio de espejo líquido.

Físico y escritor excéntrico, debe su fama sobre todo a una célebre denuncia. Francia se estremeció, en 1904, cuando reveló que no existían los rayos N, que decía haber descubierto René Blondlot, de la Universidad de Nancy. A petición de Wood, Blondlot le hizo en su laboratorio, a oscuras, una demostración de cómo se detectaban, una vez filtrados por un prisma, los rayos N, que, sostenía Blondlot, se parecían a los rayos X. Wood no se lo creía; sustrajo el prisma, esencial para el experimento, y se lo metió en el bolsillo. Blondlot no se percató de la falta, y sus resultados, tampoco.

Pero el espejo líquido de Wood no tuvo tanta suerte. La construcción de un objeto de esas características exige especial habilidad técnica, de la que carecía. Fotografió las estrellas que pasaban ante su objetivo, pero las imágenes eran borrosas. No era adecuado el cojinete sobre el que estaba apoyado el espejo; por culpa de ello, la velocidad de rotación del mercurio no permanecía constante y la distancia focal se alteraba. Además, vibraciones y corrientes de aire produjeron rugosidades en la superficie del mercurio. Por si esto fuera poco, otra dificultad de primer orden acosó al astrónomo: un espejo líquido no se puede inclinar como se inclina, para compensar la rotación de la Tierra, un espejo de cristal, y por esa razón las estrellas quedaron grabadas en la película fotográfica en forma de rayas. Wood relató con gracia todos estos problemas en un artículo que se publicó en el *Astrophysical Journal*.

Así se quedaron las cosas hasta que, en enero de 1982, un equipo de científicos demostró la eficacia de un método extraordinario que resolvía el problema de la inclinación. James E. Gunn y Peter Schneider, de la Universidad de Princeton, y Maarten Schmidt, del Instituto de Tecnología de California, se pasaron una noche en la cima del Monte Palomar observando una franja de cielo con el telescopio Hale de cinco metros, que mantuvieron todo el tiempo apuntando a una misma posición fija. Gracias a los dispositivos de carga acoplada (DCA), finos sensores de luz de estado sólido, obtuvieron una imagen muy precisa sin haber tenido que mover el espejo del telescopio.

El detector DCA compensó la rotación de la Tierra llevando electrónicamente sus sensores de luz de este a oeste, a una velocidad igual a la de desplazamiento de las imágenes que iba captando el telescopio. Este procedimiento viene a ser como tomar una fotografía de un objeto en movimiento con una cámara que se mueva a la misma velocidad que él. Un objeto, por lo general, sólo tarda en cruzar la estrecha abertura del detector unos cuantos minutos, lo que limita la cantidad de luz que se recoge. Sin embargo, dado que noche tras noche se observan las mismas regiones del firmamento, es posible crear imágenes cada vez más intensas sumando digitalmente, mediante un ordenador, exposiciones sucesivas.

El logro de Gunn, Schneider y Schmidt reavivó mi interés por los espejos líquidos, de los que había oído hablar en mis primeros años de carrera. Aunque la idea me pareció sugestiva, nunca pensé en la viabilidad de su aplicación. Sería por los días del experimento del Monte Palomar; disfrutaba yo entonces de un período sabático en la Universidad de Arizona, donde J. Roger P. Angel y John McGraw se empeñaban en sacar partido de los

ERMANNO F. BORRA ha trabajado en los telescopios de espejo líquido desde 1982. Se doctoró en astronomía en 1972 por la Universidad del Oeste de Ontario. Adscrito desde 1975 a la Universidad de Laval en Quebec, es allí catedrático de física.

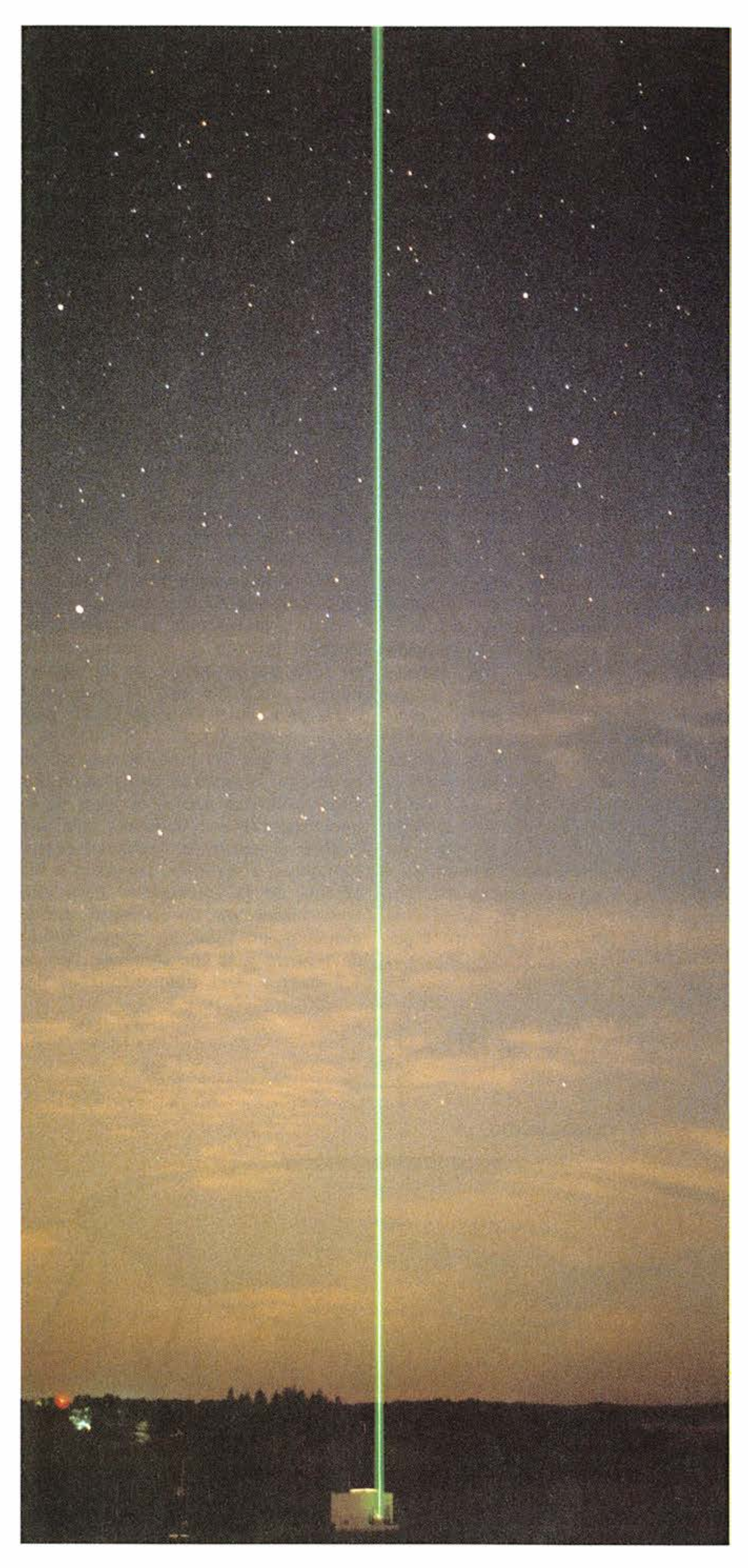
DCA. Se proponían construir un nuevo telescopio —cuyo funcionamiento es ahora rutinario— para la búsqueda de supernovas lejanas. El telescopio está fijo permanentemente, de modo que no hacen falta ni una estructura ni una cúpula móviles.

Al final de mi período sabático había caído en la cuenta de que no había ninguna razón por la que una cámara DCA pudiera recopilar imágenes precisas a partir de un espejo de cristal fijo y no a partir de uno líquido. Por supuesto, esa precisión se desperdiciaría si el espejo líquido no generase imágenes de alta calidad. De regreso en la Universidad de Laval me centré en el funcionamiento de los espejos líquidos. Encargué un cojinete lubricado por aire y un motor eléctrico. Nuestros talleres fabricaron el resto de los componentes.

Transcurridos escasos meses examinaba mi primer espejo de mercurio, de 50 centímetros de diámetro. Realicé la prueba del cuchillo: acercar una hoja afilada al haz reflejado de un punto de luz. Un espejo ideal proyecta una imagen del mismo tamaño que la fuente puntual; la imagen se eclipsa en el instante en que la punta del cuchillo corta el paso de la luz reflejada. Un espejo defectuoso difunde la luz y crea una imagen mayor, cuyo brillo circunda la punta de la hoja del cuchillo. El resultado de la prueba fue una obstrucción limpia, señal inconfundible de la parábola.

Construí otro espejo, de un metro, para estudiar la técnica del mercurio líquido. Me ayudaron Robin Arsenault y Mario Beauchemin. Los análisis posteriores confirmaron que la superficie del espejo era perfectamente parabólica y pasablemente lisa. La maquinaria sobre la que se apoyaba el espejo era tan estable, que las rugosidades de la superficie resultaron despreciables y la distancia focal, constante.

A la vista de estos esperanzadores resultados, decidí emprender un desarrollo en serio. Había que contar con una instalación adecuada para realizar mediciones ópticas exactas y dotarla de los equipos más avanzados. En la construcción hubo que atender al control de sutiles alineaciones ópticas, vibraciones del edificio y turbulencias del aire, perturbaciones capaces de ocasionar graves daños:



1. TELESCOPIO de espejo liquido de la Universidad Occidental de Ontario. El observatorio porta un sistema de detección y medición del alcance de luz. El telescopio capta la luz emitida por las moléculas que excita en la atmósfera un potente rayo láser.

si se quiere lograr un alto grado de precisión óptica, hay que reducir a un mínimo defectos de incluso 1/40 de la longitud de onda de la luz visible que se puedan producir en la superficie del espejo.

En el transcurso de nuestros primeros trabajos con un espejo de mercurio de 1,5 metros de diámetro, Stanislaw Szapiel había obtenido una imagen no resuelta de una estrella artificial en una pantalla de televisión. La ampliamos con una lente de microscopio, y para nuestro asombro el monitor mostró un disco rodeado por anillos alternos de oscuridad y luz tenue: ¡la imagen se asemejaba al patrón de difracción del espejo! La razón de que se formen sombras es que, aun cuando la calidad de una superficie óptica roce la perfección, la naturaleza ondulada de la luz impone una limitación fundamental. Las ondas de luz reflejadas por el espejo se superponen y eliminan o refuerzan, tal y como las ondas de la superficie de un estanque generan diseños complejos; aparece entonces un punto de luz, un disco rodeado de anillos sombreados que corresponden al juego constructivo o destructivo de la luz reflejada. Como consecuencia, la nitidez de una imagen no se basa tanto en la calidad del espejo cuanto en su diámetro: a mayor anchura del espejo, más nítida la imagen. Al principio nos costaba creer que lo visto en la pantalla era el patrón de difracción característico del espejo. Pero tras mucho discutir, calcular y experimentar, aceptamos la probabilidad de que nuestro espejo fuese casi perfecto.

La confirmación de esta conclusión requería la realización de pruebas aún más rigurosas. Robert Content estudió concienzudamente el espejo de 1,5 metros con un interferómetro de lámina de difusión. Este instrumento delinea el contorno de las superficies con una precisión extraordinaria. Para ello registra los patrones de interferencia de la luz. Procesamos cientos de interferogramas, grabados con una cámara DCA, hasta quedarnos satisfechos con la validez de nuestros resultados.

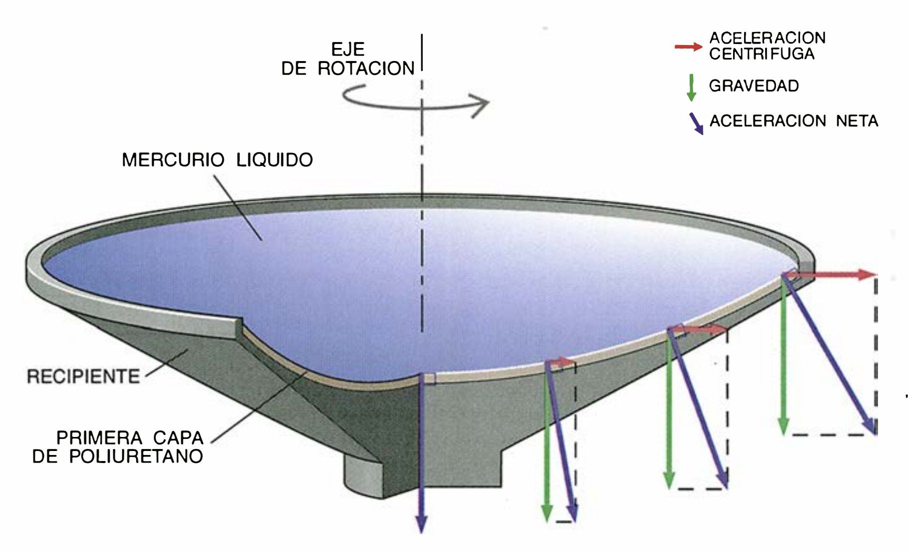
El estudio de un espejo líquido entraña mayor dificultad que el estudio de un espejo de cristal porque la superficie de un líquido puede cambiar su forma muy deprisa. No se debe tomar el promedio de las medidas, como se hace con los espejos de cristal, ya que esta operación infravaloraría las aberraciones debidas a la turbulencia del aire y a las vibraciones. Durante esta etapa de pruebas, la cuidadosa preparación rindió sus frutos. La interferometría demostró que la superficie parabólica de un espejo líquido bien afinado se mantiene precisa en 1/30, por lo menos, de la longitud de una onda de luz, lo que anda cerca de la precisión especificada para el *Telescopio Espacial Hubble*.

Pese a que las pruebas conducidas en nuestro laboratorio arrojaron en dos años resultados mucho mejores de lo que esperábamos, teníamos aún que evaluar el comportamiento del espejo líquido en el exterior, sometido a los efectos de la intemperie. Para ello construimos un observatorio donde alojamos, en 1986, un espejo líquido de 1 metro y, al año siguiente, uno de 1,2 metros. Del funcionamiento del observatorio se encargaron estudiantes; durante 63 noches despejadas rastrearon destellos estelares que estaban por confirmar, captados en otros lugares. Por detector se empleó una cámara programable de 35 milímetros, capaz de registrar rastros de estrellas cuya duración no excedía de dos minutos. No fue difícil montar este observatorio con un presupuesto razonable. Al final, la instalación en su conjunto funcionó bien. No se encontraron los destellos; concluimos que, de existir, no se producían con frecuencia. Pero lo realmente importante fue que este trabajo condujo a una publicación que ha marcado un hito: la descripción de la primera investigación llevada a cabo con éxito gracias a un espejo líquido.

Pero, ¿qué observaciones pueden realizarse con un telescopio, por muy preciso que sea y por muy fácil y económico que resulte construirlo, si no es posible apuntarlo a voluntad? La mayoría de los sistemas de detección y registro pueden adaptarse a un telescopio fijo. Aunque no hubiese más que la técnica ya probada —la que registra las observaciones con los DCA—, es de esperar que los telescopios de espejo líquido faciliten apreciablemente los rastreos astronómicos.

Estos instrumentos deberían beneficiar a los cosmólogos. Ellos trazan el mapa del universo y tienen que observar objetos extremadamente tenues; necesitan, por tanto, observar durante largo tiempo con telescopios de gran diámetro, pero, dado su elevado coste, nadie puede acceder a ellos a título individual. Hay tal demanda de tiempo de observación en telescopios de cierto tamaño, que ni siquiera un equipo reunido en régimen de cooperación conseguirá más de una docena de noches al año para un proyecto específico. Por consiguiente, se tarda años en completar un rastreo.

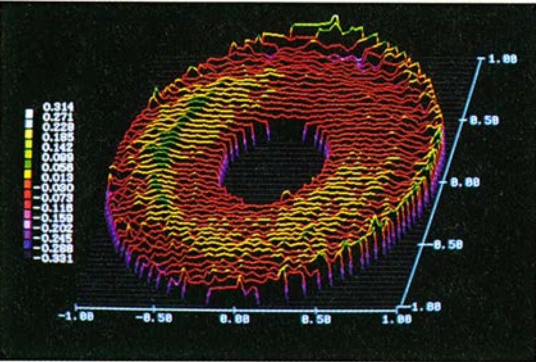
Los cosmólogos podrían disponer de los telescopios de espejo líquido más a menudo que de los costosos aparatos de espejo de cristal. Gracias a esa asequible técnica, el progreso de muchas tareas especializadas, desde la búsqueda de supernovas lejanas y cuásares hasta el estudio de la evolución y la topología del universo, podría avivarse. Paul Hickson, de la Universidad de la Columbia Británica, en un proyecto conjunto con la Universidad de Laval, ha construido un telescopio de espejo líquido de 2,7 metros para realizar rastreos espectroscópicos. El dispositivo utiliza un detector DCA y filtros de interferencia. Andrew E. Potter, Jr., de la NASA, y Terry Byers,

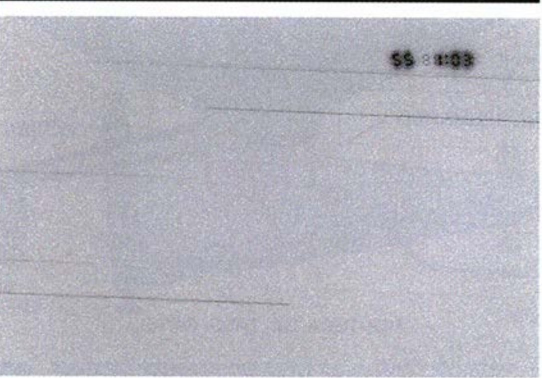


2. SUPERFICIE DE UN LIQUIDO EN ROTACION. Adopta una forma parabólica bajo la constante atracción de la gravedad y una aceleración centrífuga que crece con la distancia al eje central. La curva parabólica se produce porque una superficie líquida tiene que ser perpendicular a la aceleración neta que experimenta; en este caso, se va inclinando cada vez más conforme crece la distancia al eje.

de la compañía Lockheed, han construido un telescopio de espejo líquido de tres metros de diámetro destinado a la búsqueda de desechos espaciales no mayores de un centímetro, que constituyen una amenaza para naves y estaciones espaciales.

Esta novedosa técnica ofrece, amén de grandes tamaños, valiosas propiedades: alta calidad de superficie, baja dispersión, aperturas muy rápidas y un enfoque variable que se controla con suma precisión. Puede, por eso, mejorar la investigación en numerosos campos de la ciencia. Hemos trabajado con el grupo dirigido por Robert J. Sica en la construcción de un espejo líquido que haga de receptor en un sistema de detección y medición del alcance (LIDAR). Este tipo de instrumento inspecciona la atmósfera a una altitud de 30 a 110 kilómetros. En primer lugar, el dispositivo dispara un potente rayo láser hacia el cielo para excitar las moléculas de la atmósfera; éstas emiten luz, cuya intensidad y longitud de onda indican las condiciones de densidad y temperatura del lugar donde se encuentren. El receptor recoge esta luz delatadora para interpretarla. La potencia captadora de luz que tiene nuestro espejo de mercurio de 2,65 metros convierte a este sistema en uno de los analizadores de la atmósfera más sensibles que hay.





3. LOS ESPEJOS LIQUIDOS aportan superficies ópticas extraordinarias. El interferograma (*arriba*) corresponde a un espejo líquido de 2,5 metros de diámetro. El análisis por ordenador ofrece una versión en falso color que muestra el contorno de la superficie del espejo (*centro*). Los rastros de estrellas (*abajo*) se obtuvieron mediante un espejo líquido de 1,2 metros y una cámara fotográfica, en 1987.

Dada la precisión de su forma parabólica, los espejos fluidos valen también como superficies de referencia, de bajo coste, para las comprobaciones que han de hacerse en los talleres ópticos. El uso más original que hasta el momento se le haya dado a un espejo líquido se debe a Nathalie Ninane, del Centro Espacial de Lieja. Le saca hologramas a un espejo de mercurio de 1,4 metros; iluminados de nuevo, generan imágenes que sirven de guía para que al pulir los espejos de cristal se consigan parábolas perfectas.

Me movía en un principio la posibilidad de construir espejos de diámetros gigantescos, de más de 30 metros incluso. ¿Hasta qué diámetro podemos llegar realmente? Sólo lo sabremos si intentamos construir espejos cada vez más anchos. La relativa facilidad con que preparamos el espejo de 2,7 metros y lo económico que nos resultó son buenos presagios. De todos modos, hay varios factores que podrían limitar el tamaño.

La curvatura de la Tierra introduce una pequeña variación focal, que puede corregirse. Hay, sin embargo, un factor geofísico preocupante: el efecto Coriolis, que imprime un aspecto de espiral a las masas de aire que se mueven por el globo. Este efecto se da cuando un objeto, por ejemplo la superficie de un líquido que gira, se mueve sobre un marco de referencia giratorio, como la Tierra. Hickson y Brad K. Gibson, por un lado, y yo, por otro, hemos calculado que éste no sería un problema grave. De todas formas, nuestras primeras observaciones indicaron que el viento sí crea perturbaciones notables. Aunque una construcción aísle el espejo líquido de corrientes externas, el aire que su propia rotación genera terminaría por poner un tope a su tamaño. Las zonas periféricas de un espejo grande se mueven a mayor velocidad que las de un espejo menor, y esa velocidad superior genera una mayor turbulencia local en el aire.

Afortunadamente, disponemos de diversas opciones para reducir a un mínimo el barrido de la superficie por el aire. El uso de capas delgadas de mercurio amortigua bastante las perturbaciones. Una capa de moléculas orgánicas, de lípidos por ejemplo, que flote sobre el mercurio también amortiguará las ondas producidas por el viento. Una solución garantizada consiste en colocar una película de plástico sobre el líquido en rotación. Tras probar una serie de materiales, vimos que con películas delgadas y fuertes de mylar se protege la superficie del espejo sin que la luz se distorsione.

Se pueden lograr otras mejoras. Como el mercurio es pesado, reemplazarlo por un líquido más ligero sería ventajoso: un espejo que pesase menos descansaría sobre un cojinete y un recipiente más baratos. Por ello hemos empezado a experimentar con galio, metal líquido más ligero que el mercurio. Los resultados son esperanzadores, y aunque el galio se solidifica a 30 grados, se le subenfría con facilidad. El subenfriamiento consiste en mantener una sustancia en estado líquido por debajo de la temperatura a la que normalmente se solidifica. John Gauvin y Gilberto Moretto subenfriaron muestras de galio hasta –30 grados. Comprobaron que las muestras siguieron en estado líquido, de forma estable, durante varias semanas; se solidificaron sólo cuando la temperatura descendió de los –30 grados. Gauvin fabricó un espejo de aleación de galio de 50 centímetros de diámetro cuyo funcionamiento fue bastante aceptable.

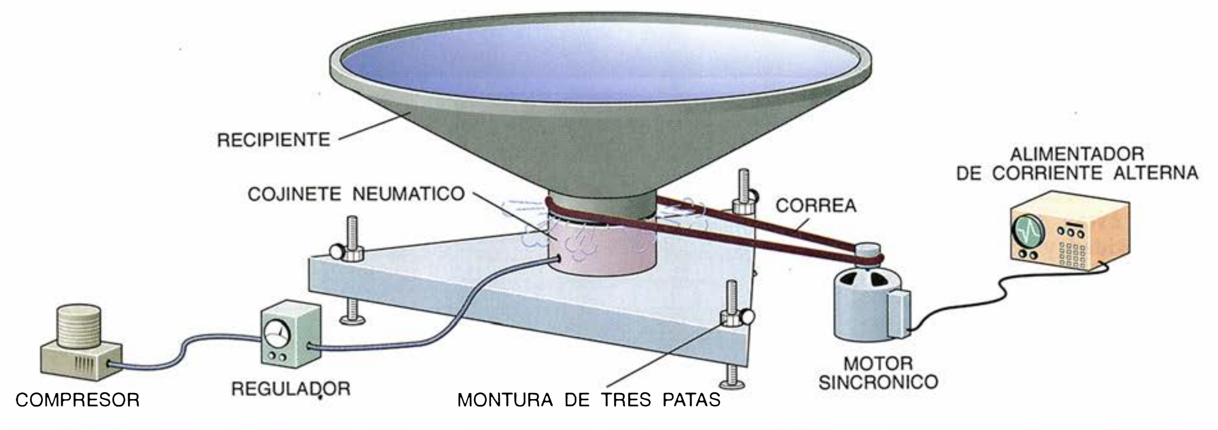
Las mejoras de los dispositivos de corrección óptica, al expander la zona de cielo de la que le llegue luz al aparato, aumentarán también la utilidad de los telescopios provistos de espejos líquidos. Cuando la luz se refleja en un espejo parabólico, sólo

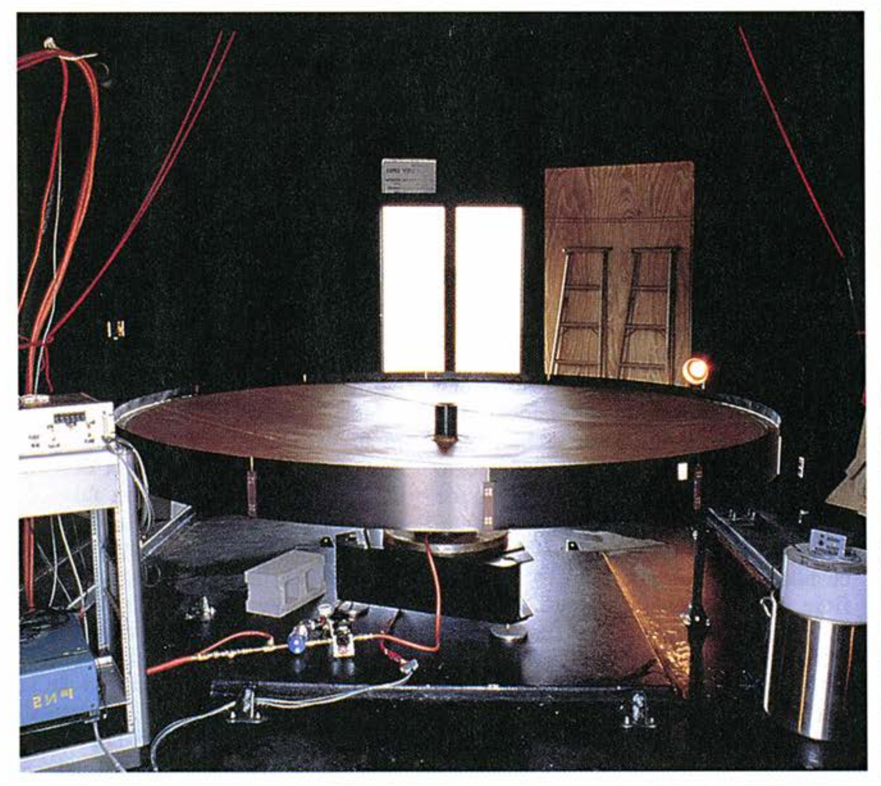
convergen en un punto las imágenes de los objetos puntuales y distantes que estén situados directamente sobre el centro de la parábola. Las imágenes de los puntos apartados de este eje central son manchas, cuyo tamaño aumenta con su distancia al eje, lo que produce borrosidad. Estas distorsiones, que se dan en cualquier telescopio, se aminoran por medio de dispositivos ópticos auxiliares. Se trata de lentes o espejos coordinados que alinean los rayos extraviados de la luz reflejada; de esa manera se eliminan muchos errores de la imagen final. La disposición habitual de estos instrumentos permite obtener imágenes fidedignas con una anchura de alrededor de un grado, que es el doble del diámetro aparente de la Luna. Con telescopios ubicados en varias latitudes de forma que abarquen diferentes partes del cielo, se ensancha la zona de visión. Sin embargo, sería más eficiente y mucho menos costoso desarrollar dispositivos de corrección perfeccionados para ampliar el campo de visión de un solo telescopio.

Con ese propósito, Harvey R. Richardson y Christopher L. Morbe di-

Así funcionan los telescopios de espejo líquido

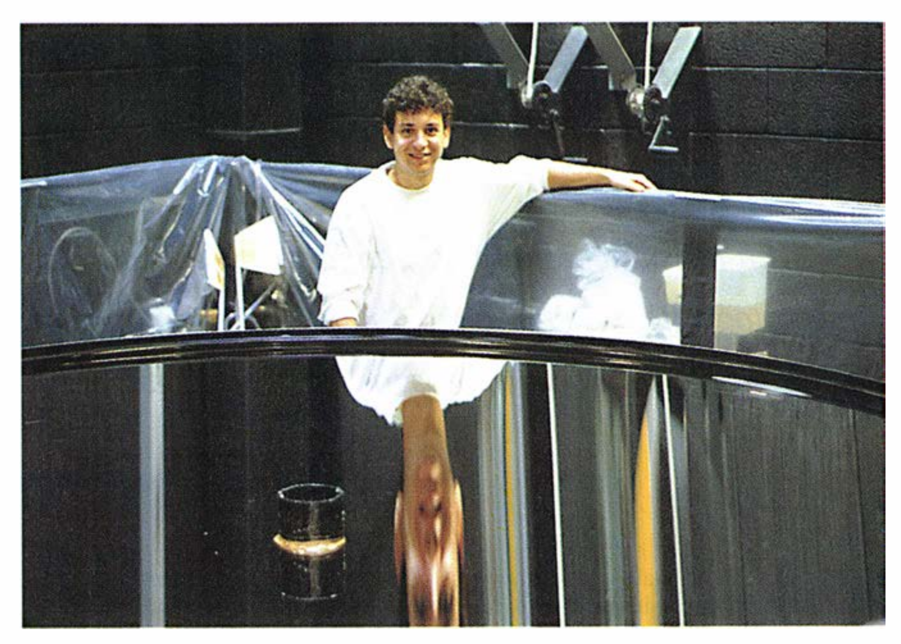
La NASA ha construido un espejo líquido de tres metros de diámetro (*abajo, a la izquierda*) que buscará desechos espaciales. El diagrama (*arriba*) muestra cómo funciona. El espejo y el cojinete descansan sobre una montura de tres patas; el eje de rotación se alinea verticalmente por medio de dos tornillos ajustables. Un motor eléctrico sincrónico, conectado mediante poleas y una correa, mueve el girador situado bajo el recipiente del espejo; un alimentador de corriente alterna, estabilizado por un oscilador de cristal, controla el motor. Sobre el recipiente base se fragua una parábola sólida hecha de una resina de poliuretano. Una vez endurecida, se vierte el mercurio líquido en el cuenco. La sencillez del diseño de los espejos líquidos los hace asequibles y fáciles de construir. En el rudimentario observatorio (*abajo, a la derecha*) construido en Laval en 1987 se efectuó la primera investigación astronómica realizada con un espejo líquido. La construcción de un espejo de 2,7 metros de diámetro costaría algo más de dos millones de pesetas.







señaron un corrector por ordenador que contrarrestara los errores específicos que se producen en las reflexiones de los espejos líquidos. El instrumento, de manejo un tanto difícil, ha de orquestar el movimiento de tres espejos. Aun así, gracias al corrector los espejos líquidos producen imágenes excelentes de luz que incide en el espejo formando un ángulo de hasta 7,5 grados con el eje central. Este trabajo pionero demuestra que es posible corregir las aberraciones introducidas cuando la luz se refleja en ángulo agudo en la superficie parabólica líquida.



4. ESPEJO LIQUIDO, de 2,7 metros. Al cuidado de Luc Girard, es el receptor de un monitor atmosférico. Se encuentra en la Universidad Occidental de Ontario.

Pocas limitaciones afectan, en teoría, a los correctores optimizados. Con ellos, los telescopios de espejo líquido, a pesar de la estrechez del campo de visión, deberían tener a su alcance buena parte del cielo visible, lo que es de apreciar en espectroscopía o en la fotografía de muy alta resolución. Desde un punto de vista práctico, Ming Wang, Gilberto Moretto y yo, en colaboración con Gerard Lemaître, exploramos nuevas adaptaciones de los espejos correctivos. Lemaître inauguró esta técnica óptica, que consiste en deformar espejos hasta darles una morfología compleja que elimine los errores de reflexión. Recientemente, Wang, Moretto y yo hemos diseñado por ordenador un corrector de alta capacidad, con dos espejos auxiliares. Da excelentes imágenes de zonas del cielo que están desplazadas del eje central nada menos que 22,5 grados.

Un dispositivo holográfico podría, al menos en teoría, servir de mediador perfecto que reconciliase las diferencias entre la luz reflejada y su fuente de origen. Podría colocarse en el haz de luz reflejada un holograma grabado de antemano. Al pasar la luz a través del holograma, se filtrarían los errores predecibles. Mosaicos de hologramas generados por ordenador compensarían las aberraciones que se producen cuando la luz viaja largos trechos desde el cénit, a través de grandes campos de visión.

¿Podría instalarse en el espacio un telescopio provisto de espejo líquido? La idea es muy atractiva; los espejos líquidos gozan de excelentes cualidades ópticas, pesan poco y es fácil embalarlos. Pese a sus temperaturas extremas, la Luna podría, sin duda, albergar un telescopio así. El espejo, hecho de ligera aleación de galio, o quizá de una aleación alcalina aún más ligera, permanecería en estado líquido porque esas aleaciones tienen temperaturas de fusión muy bajas. En cambio, pensaba hasta hace poco que poner un telescopio de espejo líquido en órbita era imposible. La gravedad proporciona la aceleración necesaria para que se forme una parábola en la Tierra o en la Luna; un telescopio orbital se encontraría en estado de caída libre, así que no le afectaría la gravedad. No sería práctico que un motor proporcionara la aceleración requerida, ya que acabaría por quedarse sin combustible.

Las posibilidades que ofrecerían los vehículos impulsados por velas solares han hecho que cambie de parecer. En 1992, publiqué un artículo en el *Astrophysical Journal* donde examinaba la posibilidad de que velas solares propulsasen telescopios de espejo líquido en órbita. El Sol proporciona una fuente inagotable de energía, que una vela solar emplearía en darle aceleración a la superficie líquida, para transformarla en una parábola. Quizá parezca una idea más fantasiosa que científica, pero se basa en supuestos razonables. No se ha lanzado todavía con éxito una nave impulsada por velas solares, pero un estudio realizado por la NASA a finales de los años setenta mostraba la viabilidad de esos vehículos.

Para que el espejo acelerado por las velas solares no fuese adquiriendo velocidad hasta el punto de acabar saliéndose del sistema solar bastaría con que el recipiente se desplazara más lentamente que su propia velocidad orbital. La vela solar contrarrestaría entonces la atracción gravitatoria para que el telescopio se mantuviese en órbita. Es posible que reemplazara a toda la fuerza de gravedad; así se tendría un instrumento estacionario capaz de largos tiempos de integración. Colin McInnes ha demostrado que los vehículos provistos de velas solares podrían navegar por múltiples rutas y cambiar de órbita. En tal caso, cabría apuntar un telescopio de espejo líquido en órbita como si fuera un telescopio corriente.

En el número de junio de 1987 de *Physics Today*, Per H. Andersen escribía una nota que llevaba por título: "¿Observarán los futuros astrónomos con espejos líquidos?" Siete años más tarde, se han construido unos cuantos telescopios de ese tipo. ¿Cuántos astrónomos van a utilizarlos? El tiempo lo dirá, pero espero que, en el peor de los casos, sirvan para tareas astronómicas especializadas, como los rastreos. En el otro extremo, sueño que un día recaiga sobre ellos la mayor parte de la investigación astronómica, quedando relegados los telescopios inclinables a misiones muy concretas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LIQUID MIRROR TELESCOPES: HISTORY. B. K. Gibson en *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, vol. 85, número 4, páginas 158-171; agosto de 1991.

THE CASE FOR LIQUID MIRRORS IN ORBITING TELESCOPES. E. F. Borra en *Astrophysical Journal*, vol, 392, número 1, páginas 375-383; 10 de junio de 1992.

LIQUID MIRRORS: OPTICAL SHOP TESTS AND CONTRIBUTIONS TO THE TECHNOLOGY. E. F. Borra, R. Content, L. Girard, S. Szapiel, L. M. Boily en *Astrophysical Journal*, volumen 393, n.º 2, páginas 829-847; 10 de julio de 1992.

Arquitectos moleculares del diseño corporal

La introducción de un gen humano en una mosca nos evoca escenas cinematográficas de un relato fantástico. Más importante: sirve para demostrar que las formas corporales de todos los animales se definen por mecanismos casi idénticos

William McGinnis y Michael Kuziora

Todos los animales se desarrollan a partir de un huevo fecundado que, tras experimentar múltiples tandas de división, origina, por lo común, millones de células embrionarias. Mediante un sorprendente proceso de autoorganización, envuelto todavía en el misterio, estas células se disponen formando un organismo completo en el que hueso, músculo, cerebro y piel se integran en un conjunto armónico. El proceso fundamental es constante, no así los resultados: seres humanos, ratones, moscas y gusanos representan un amplio muestrario de diseños corporales.

Ante semejante diversidad, los biólogos suponían que los arquitectos moleculares de la morfología corporal —procesos genéticos que controlan el desarrollo embrionario en las diferentes especies— serían también muy variopintos. Pero hay pruebas convincentes de que un grupo de genes relacionados entre sí, los llamados genes *HOM* en invertebrados y genes *Hox* en vertebrados, dirige aspectos similares del diseño corporal en todos los embriones animales.

Al menos en lo concerniente a algunos sistemas moleculares que moldean nuestra forma, los seres humanos nos parecemos, seguramente, mucho más de lo que nos gustaría a gusanos e insectos, nuestros parientes lejanos. Tanto, que en los laboratorios se han empleado genes *Hox* de ratón y humano para guiar el desarrollo de embriones de la mosca del vinagre.

WILLIAM McGINNIS y MICHAEL KUZIORA investigan el papel ejercido en el desarrollo por la superfamilia de genes con secuencia homeótica. McGinnis enseña biofísica en Yale. Investigando en la Universidad de Basilea descubrió con Michael Levine la secuencia homeótica en genes de *Drosophila*. Kuziora es profesor en Pittsburgh.

El relato histórico sobre estos arquitectos moleculares universales se remonta a los estudios genéticos que iniciara Edward B. Lewis, quien ha pasado gran parte de los últimos 40 años estudiando el complejo *bithorax*, un pequeño grupo de genes homeóticos de *Drosophila melanogaster*, la mosca del vinagre. El término griego *Homeo* significa "semejante"; por lo mismo, se denominan homeóticos aquellos genes de la mosca que, tras sufrir mutación, adquieren capacidad de transformar un segmento de su cuerpo en la réplica de otro. Las mutaciones en los genes del complejo *bithorax* suelen producir este tipo de defectos en el desarrollo de la parte posterior del plano corporal de la mosca. El equipo de Thomas C. Kaufman ha descubierto un segundo grupo de genes homeóticos de la mosca, el complejo *Antennapedia* (que debe su nombre al gen fundador del complejo, *Antennapedia*). Las mutaciones en estos genes producen defectos homeóticos en la parte anterior del cuerpo.

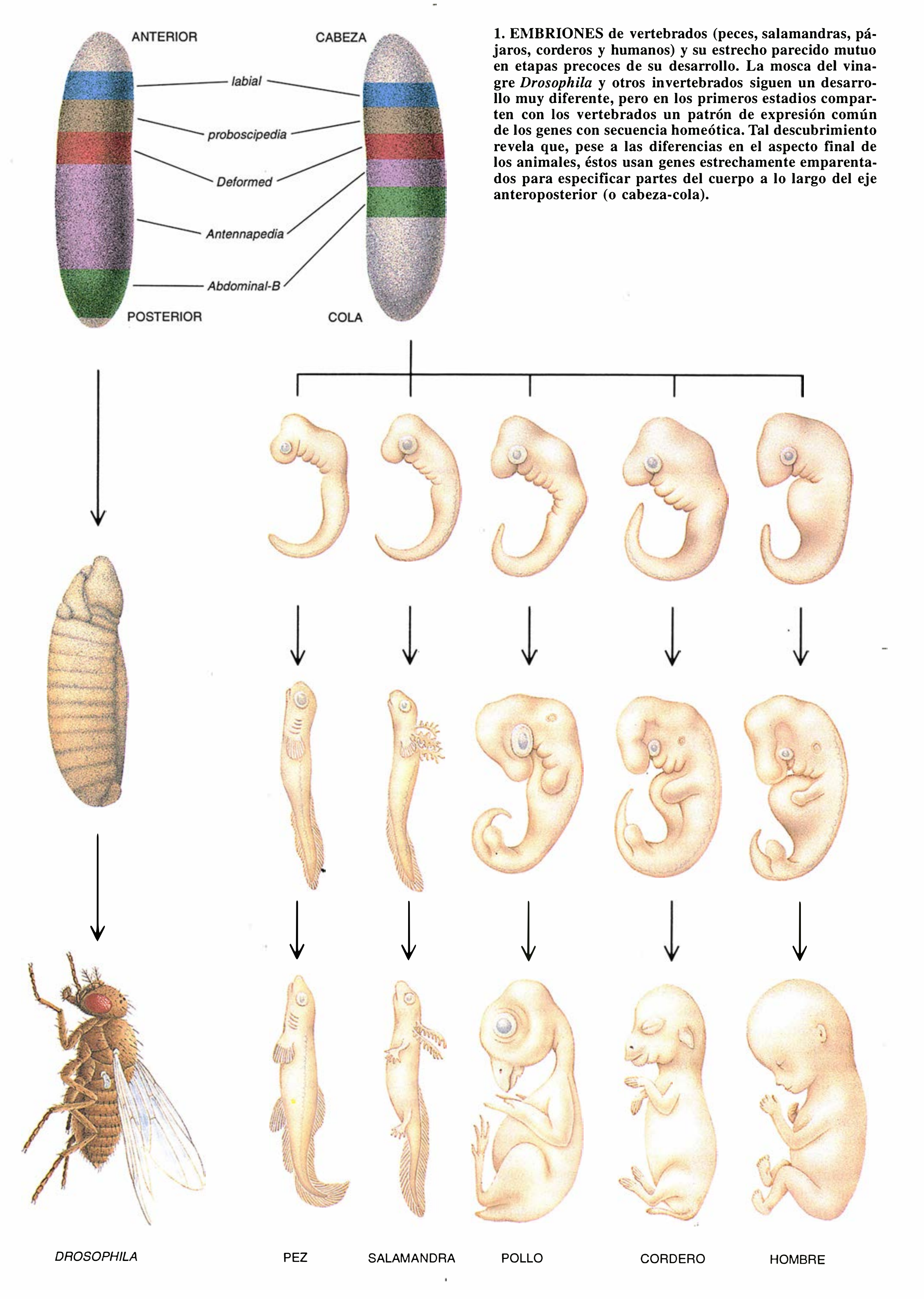
Ocurre a menudo en biología que ciertos defectos raros observados en animales extraños encierran la clave para resolver problemas importantes. Pocos fenómenos producen mayor extrañeza que las alteraciones del diseño corporal causadas por las mutaciones homeóticas; a modo de botón de muestra: algunas mutaciones del gen *Antennapedia* determinan que las antenas de la cabeza de la mosca del vinagre se transformen en un par supernumerario de patas torácicas. Para mayor admiración, algunos individuos que desarrollan las patas supernumerarias sobreviven, se alimentan e incluso se aparean con moscas normales.

Los *Antennapedia* que llegan a adultos constituyen una rareza, puesto que casi todas las mutaciones inducidas en genes homeóticos producen defectos embrionarios letales en *Drosophila*. Pero también estos embriones que mueren pueden enseñarnos mucho. A este respecto, Ernesto Sánchez-Herrero y Ginés Morata descubrieron que la eliminación de los tres genes del complejo *bithorax —Ultrabithorax*, *abdominal-A* y *abdominal-B—* resultaba letal. Sin embargo, estos embriones mutantes viven lo bastante para desarrollar estructuras especializadas que ponen de manifiesto la transformación de los ocho segmentos abdominales en segmentos torácicos.

De sus estudios genéticos iniciales sobre el complejo *bithorax* Lewis extrajo dos importantes conclusiones. La primera, que la función normal de estos genes homeóticos estriba en conferir a las células identidades espaciales (o posicionales) inequívocas en diferentes regiones a lo largo del eje anteroposterior de la mosca. Esto es, los genes les "dicen" a las células si forman parte de la cabeza, el tórax o el abdomen de la mosca.

Estas identidades son hasta cierto punto abstractas, por cuanto las coordenadas espaciales asignadas por los genes homeóticos se interpretan de diversa forma en distintos estadios de desarrollo. *Antennapedia* confiere identidad torácica lo mismo durante el período embrionario que durante el pupal del ciclo vital de la mosca, aunque las estructuras (órganos sensoriales, patas, alas, etcétera) que se desarrollan en el tórax difieren en larvas y adultos.

La segunda conclusión importante a la que llegó Lewis fue que el orden lineal que presentan los genes del complejo *bithorax* en el cromosoma de la mosca se corresponde exactamente con el orden de las regiones corporales que dichos genes especifican a lo largo del eje anteroposterior del embrión. La misma relación se mantiene en el caso de los genes del complejo *Antennapedia*.



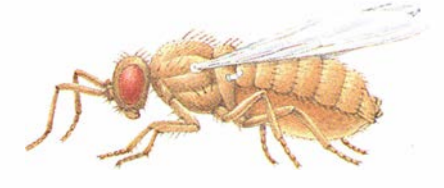
1. EMBRIONES de vertebrados (peces, salamandras, pájaros, corderos y humanos) y su estrecho parecido mutuo en etapas precoces de su desarrollo. La mosca del vinagre *Drosophila* y otros invertebrados siguen un desarrollo muy diferente, pero en los primeros estadios comparten con los vertebrados un patrón de expresión común de los genes con secuencia homeótica. Tal descubrimiento revela que, pese a las diferencias en el aspecto final de los animales, éstos usan genes estrechamente emparentados para especificar partes del cuerpo a lo largo del eje anteroposterior (o cabeza-cola).







MOSCA NORMAL



MOSCA MUTANTE *Antennapedia*

2. TRANSFORMACIONES HOMEOTICAS se producen en moscas del vinagre que han sufrido mutaciones en genes homeóticos. A modo de ejemplo, las mutaciones del gen *Antennapedia* pueden hacer que aparezcan cinturones de dentículos torácicos (espínulas) en las cabezas de las larvas (*arriba, a la derecha*). Otra consecuencia de la mutación es que, a las moscas mutantes, les salen patas donde debía haber antenas (*abajo, a la derecha*). A la izquierda se muestran una larva y un adulto normales.

Unidos por estas características comunes, los genes de los complejos *bithorax* y *Antennapedia* reciben la denotación de complejo *HOM*.

La observación de los lugares del embrión donde se muestran activos los genes del complejo *HOM* nos puede llevar a comprender, siquiera en parte, cómo determinan éstos las posiciones axiales en el plan corporal de la mosca del vinagre. Los genes *HOM* están en el ADN de todas las células de la mosca, pero sólo se expresan en algunas. Cuando se activan, estos genes se copian en moléculas de ARN mensajero, que sirven de molde para la síntesis de proteínas HOM. Antes de que las regiones del embrión muestren signo alguno de su destino final, los genes del complejo *HOM* se activan en bandas celulares sucesivas a lo largo del eje anteroposterior. Algunas de estas bandas de activación se solapan, pero cada gen del complejo *HOM* tiene un límite de activación anterior propio en el plan corporal.

Si la deleción del gen o algún incidente similar impide la expresión de una proteína HOM, las células embrionarias, que abundan en esa proteína, experimentan a menudo una transformación homeótica, transformación debida a un gen homeótico de reserva ya activo en las mismas células y que puede reemplazarle con su propia información posicional. Por ejemplo, si se elimina de las células de la región anterior del abdomen la función del gen *Ultrabithorax*, *Antennapedia* se encargará del desarrollo de esa región. Por consiguiente, estructuras asociadas sólo con el tórax (región que *Antennapedia* contribuye a especificar) aparecen también en posiciones más rezagadas.

Las mutaciones que expresan un gen homeótico en una posición incorrecta provocan también transformaciones homeóticas. Así, se originan las mutaciones *Antennapedia* en las moscas adultas cuando se activa el gen *Antennapedia* en la cabeza, lugar donde suele hallarse inactivo. En resumen, las pruebas genéticas indican que son necesarios todos los genes del complejo *HOM* para especificar el destino de las células situadas en cierta posición del eje anteroposterior durante el desarrollo: cabeza posterior, tórax, etcétera. Más importante (y más revelador de su función biológica) resulta el hecho de que la actividad de cada gen del complejo *HOM* es suficiente, según parece, para determinar el destino de algunas células por lo menos, aun cuando éstas no se encuentren bajo la influencia normal de un gen dado.

Los genes del complejo *HOM* son virtualmente los únicos de *Drosophila* que gozan de esas propiedades. También comparten una interesante semejanza estructural, al ser todos ellos miembros de la familia génica con secuencia homeótica. Esta caja homeótica, como también se la llama, es una secuencia de ADN que contiene las instrucciones para la síntesis de un grupo emparentado de homeodominios, regiones proteicas de un tamaño de 60 aminoácidos. El prefijo *homeo-* proviene de su descubrimiento inicial en las proteínas HOM de *Drosophila*. Desde entonces se han encontrado homeodominios con varios grados de similitud en otras muchas proteínas. Los correspondientes a las proteínas HOM de *Drosophila* revelan una estrecha semejanza mutua, indicio de parentesco. De ahí les viene la denominación de homeodominios de la clase *Antennapedia*.

¿Qué función bioquímica desempeñan estas proteínas HOM? No podemos dar todavía una respuesta satisfactoria. Pertenecen a un grupo de proteínas que se unen al ADN en las zonas reguladoras de los genes. La combinación apropiada de estas proteínas enlazadas en un elemento regulador del ADN señalará la activación o la represión de un gen, es decir, el comienzo o la interrupción de la síntesis de la proteína determinada por ese gen. Se ha demostrado que la región del homeodominio de las proteínas HOM constituye la fracción que interacciona directamente con los sitios de unión al ADN.

Llama poderosamente la atención el contraste ofrecido entre la semejanza estructural de las proteínas HOM y sus efectos, diversos y específicos. Se trata de una familia de proteínas que se unen, todas, al ADN y derivan, presumiblemente, de un mismo polipéptido ancestral de la clase Antennapedia. Pero cumplen misiones dispares en el desarrollo: una proteína determina que unas células se conviertan en parte de la cabeza, otra

que lo hagan en parte del tórax, etc. Parece probable que las proteínas HOM designen diversas posiciones a lo largo del eje anteroposterior regulando la expresión de lo que quizá sean grandes grupos de genes subordinados (genes diana). La especificidad funcional de las proteínas HOM puede residir, por tanto, en las diferencias entre ellas que las permiten regular, de modo selectivo, ciertos genes en los embriones.

Con el fin de conocer mejor esta especificidad, en 1986 decidimos construir proteínas HOM quiméricas, formadas por elementos procedentes de distintas fuentes. (La quimera era un monstruo de la mitología griega que tenía cabeza de león, vientre de cabra y cola de dragón.) Pensamos que, ensayando la función de estas proteínas quiméricas, podríamos definir qué subregiones de las proteínas HOM determinan sus propiedades reguladoras selectivas.

Para nuestros primeros experimentos escogimos las proteínas HOM Deformed, Ultrabithorax y Abdominal-B, que tienen homeodominios estructuralmente similares: el de la proteína Deformed es idéntico al de la proteína Ultrabithorax en 44 de sus 66 aminoácidos; no comparten, sin embargo, un parecido generalizado en otras regiones. Cada una de estas proteínas influye también en otros genes de la familia *HOM*. Así, la proteína Deformed activa selectivamente la expresión de su propio gen; la proteína Ultrabithorax reprime la expresión del gen *Antennapedia*; y la proteína Abdominal-B regula su propio gen y los de otras proteínas en el complejo *HOM*, entre ellos *Antennapedia*, *Ultrabithorax* y *abdominal-A*. Cabía, pues, aprovechar esas relaciones de autorregulación y regulación cruzada para comprobar las funciones específicas de las proteínas HOM quiméricas.

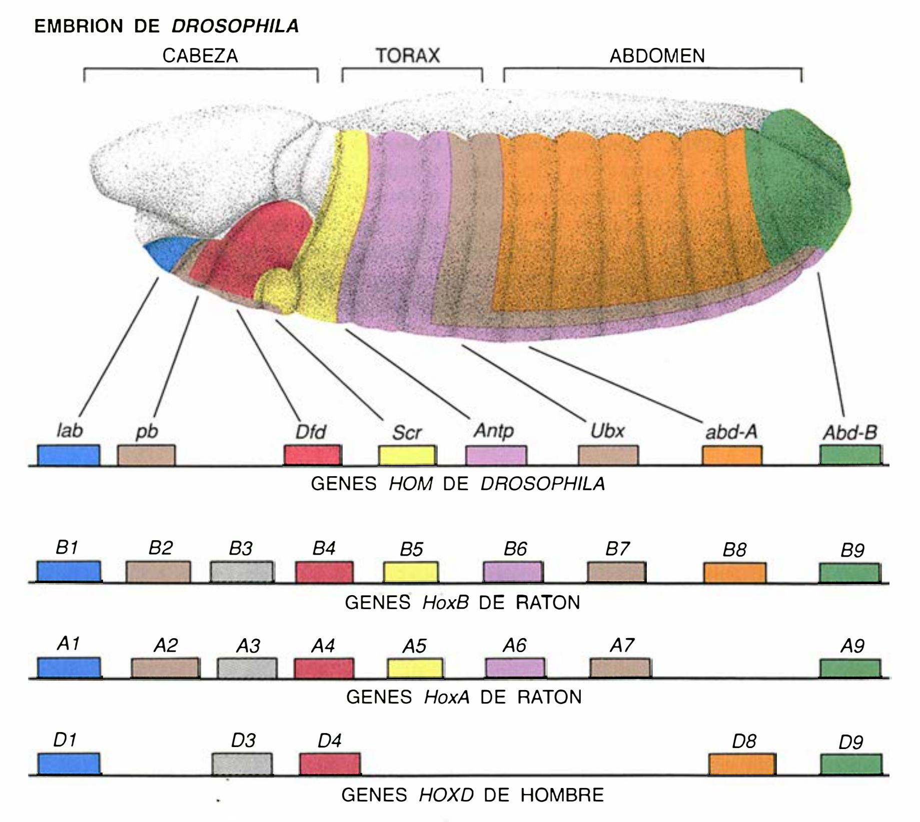
El primer desafío que se nos planteaba era crear genes que codificaran las proteínas homeóticas quiméricas que deseábamos. Esto fue factible gracias a las técnicas de ADN recombinante de corte y empalme de pequeños segmentos del ADN génico. Si la ingeniería genética se ejecuta debidamente, los dominios pueden trasladarse con suma precisión de una proteína a otra conservando sus características funcionales. Teníamos luego que asegurarnos de que los genes quiméricos fueran activos en todos los tejidos embrionarios. Para ello recurrimos a un método desarrollado años atrás por Gary Struhl que requería la unión del gen a secuencias de ADN regulador que pueden activarse por choque térmico moderado. Por último, insertamos nuestras quimeras del gen *HOM* inducibles por calor en los cromosomas de *Drosophila* mediante la técnica de transformación por elementos P.

Las moscas de *Drosophila* así transformadas portarían en adelante los genes quiméricos en todas las células de su cuerpo; y ellos producirían las proteínas quiméricas en cualquier momento del desarrollo con sólo subir la temperatura de la cámara de crecimiento a 37 ºC durante un breve período. (*Drosophila* vive a 25 ºC, pero puede tolerar 37 ºC durante una o dos horas sin sufrir efectos dañinos.) Pudimos ensayar la capacidad de las proteínas quiméricas para actuar sobre los elementos reguladores de los genes diana en sus posiciones cromosómicas normales y en su entorno embrionario natural —una prueba rigurosa que remeda de cerca las condiciones habituales en las que operan estas proteínas.

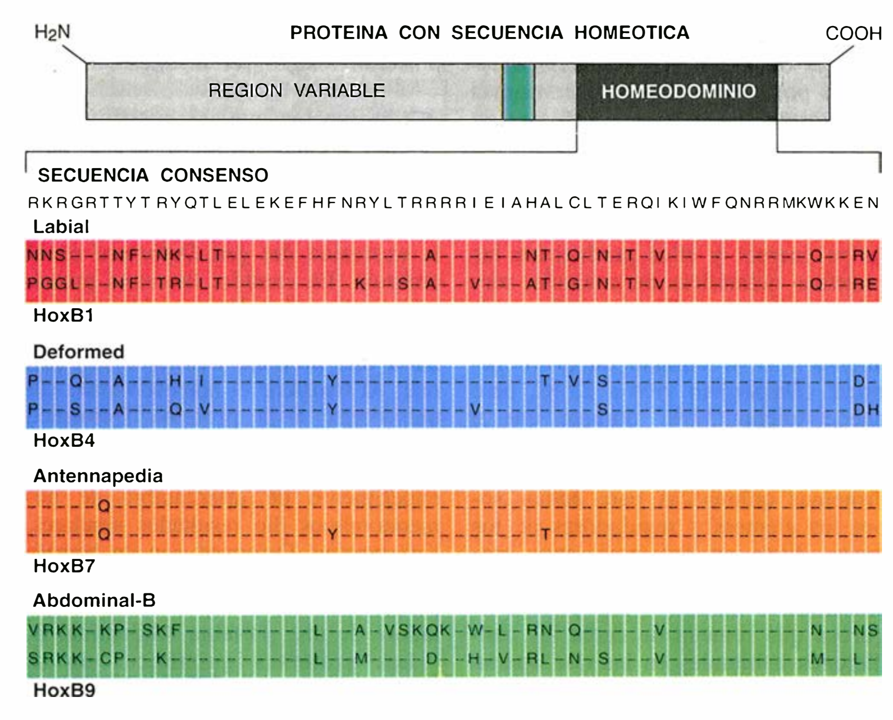
Puesto que las proteínas HOM tienen homeodominios muy similares, se unen a sitios de ADN casi idénticos en los ensayos de laboratorio. Al principio parecía probable que las características que dotaban de especificidad funcional a cada proteína se encontrasen fuera del homeodominio —en las regiones de la proteína más idiosincrásicas. Sin embargo esa suposición resultó ser errónea.

Observamos que, si sustituíamos el homeodominio nativo de una proteína Deformed por un homeodominio Ultrabithorax, la proteína quimérica perdía su capacidad para regular la expresión del gen *Deformed* en el embrión. En cambio, la nueva proteína actuaba sobre la expresión del gen *Antennapedia* —prácticamente como lo haría una proteína Ultrabithorax normal. Al transferir el homeodominio Ultrabithorax a la proteína Deformed habíamos transferido también, veíase, sus capacidades reguladoras selectivas. Otro experimento de intercambio de homeodominios dio resultados similares. Una proteína Deformed con un homeodominio Abdominal-B en lugar del suyo propio imitaba la especificidad reguladora de una proteína Abdominal-B.

Las proteínas quiméricas no se comportaban exactamente como las proteínas de las que derivaban sus homeodominios. Lo mismo la proteína quimérica Deformed/Ultrabithorax que la Deformed/Abdominal-B activaban la expresión de sus genes diana, mientras que las proteínas Ultrabithorax y Abdominal-B normales la reprimían. Cabe suponer que regiones de la proteína Deformed situadas



3. COMPLEJOS GENICOS CON SECUENCIA HOMEOTICA, identificados en invertebrados y vertebrados. *Drosophila* tiene genes *HOM*, cuyo orden en el cromosoma de la mosca es el mismo que las regiones del cuerpo cuyo desarrollo controlan en el eje anteroposterior. Ratones y seres humanos portan genes *Hox*, emparentados con los miembros del complejo *HOM* y muestran idéntica disposición espacial y funcional.



4. LLAMANSE HOMEODOMINIOS ciertas regiones muy similares de 60 aminoácidos, presentes en las proteínas codificadas por todos los genes con secuencia homeótica. Cada letra de la secuencia consenso representa un aminoácido; se muestran desviaciones de esta secuencia para varias proteínas HOM y Hox estrechamente emparentadas.

fuera del homeodominio proporcionan una fuerte función activadora que estaba capacitada para actuar con cualquiera de estos homeodominios HOM. En coherencia con esa idea, la proteína Deformed presenta algunas regiones ricas en aminoácidos que caracterizan los "dominios de activación" de otras proteínas reguladoras génicas.

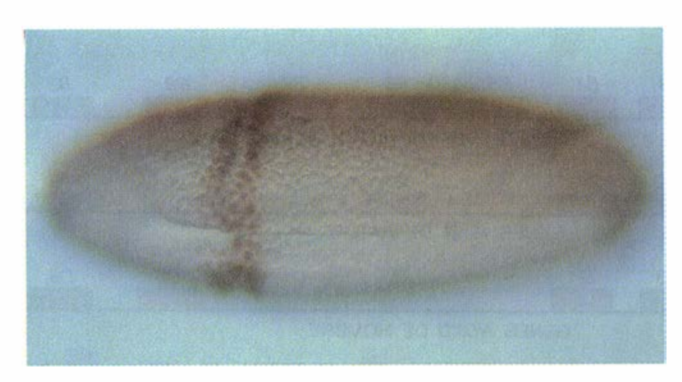
Richard Mann, David S. Hogness, Greg Gibson y Walter J. Gehring han llevado a cabo experimentos similares sobre la especificidad funcional de las proteínas HOM. Los ensayos se basaron en la evaluación de las transformaciones homeóticas que las proteínas HOM mutantes y las quiméricas inducían en el desarrollo de las moscas. Abordaron los efectos de las proteínas HOM en el desarrollo, y no sólo sus efectos sobre la expresión génica; por ello, usaron un criterio de funcionalidad de estas proteínas más restrictivo que el aplicado por nosotros. Pese a lo cual, sus resultados corroboraron la idea de que buena parte de la especificidad funcional de las proteínas HOM (aunque no toda) reside en las pequeñas diferencias existentes dentro del homeodominio o en regiones adyacentes.

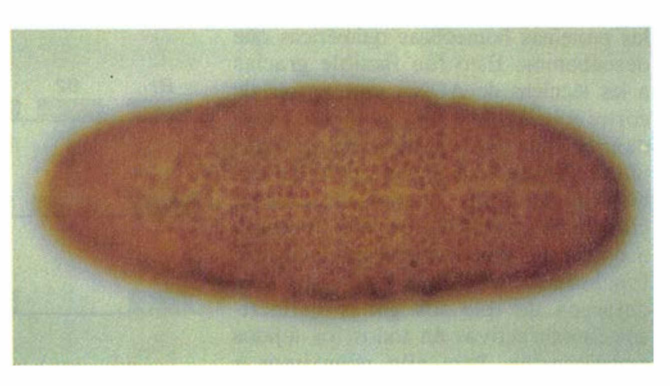
Todos estos descubrimientos nos sugerían que había una posibilidad real de que ciertos experimentos que ya estaban en marcha en nuestro laboratorio, un tanto osados y para los que sólo teníamos ligeras esperanzas de éxito, proporcionaran resultados interesantes. Se trataba de ensayos funcionales, en embriones de *Drosophila*, de proteínas con homeodominios de ratón y humanos. Antes de seguir, conviene conocer qué se sabe acerca de los genes *Hox* de mamíferos.

A lo largo de los últimos nueve años se han encontrado genes que contienen secuencias homeóticas de la clase *Antennapedia* en los cromosomas de muchas especies animales, además de *Drosophila.* Esos genes se han estudiado en ranas, ratones y seres humanos, donde se denominan genes *Hox* (abreviatura de secuencia homeótica, "homeobox", en inglés). En el ratón y en el hombre los genes *Hox* se agrupan en cuatro grandes complejos localizados en diferentes cromosomas. En cuanto a su organización y sus patrones de expresión embrionaria, los genes de los complejos *Hox* comparten un asombroso parecido con los genes del complejo *HOM* de la mosca. Por ejemplo, se pueden identificar genes *Hox* cuya estructura se acerca a la de los genes *HOM labial*, *proboscipedia*, *Deformed*, *Antennapedia* y *Abdominal-B.* Los genes *Hox* y *HOM* equivalentes se disponen en el mismo orden lineal, dentro de sus complejos respectivos.

Un ulterior paralelismo observaron, por un lado, Denis Duboule y Pascal Dollé y, por otro, el equipo de Robb Krumlauf. Recabaron pruebas concluyentes de que los patrones de expresión de los dos tipos de genes eran similares. Es decir, los genes *Hox* se activan a lo largo del eje cabeza-cola en las etapas iniciales del desarrollo embrionario del ratón en el mismo orden relativo que se activan los genes *HOM* en el eje anteroposterior de *Drosophila*.

Las semejanzas estructurales entre las proteínas de mosca y de ratón se limitan principalmente a las regiones del homeodominio. La secuencia de aminoácidos del homeodominio de la proteína Antennapedia de la mosca y la secuencia de aminoácidos del ho-

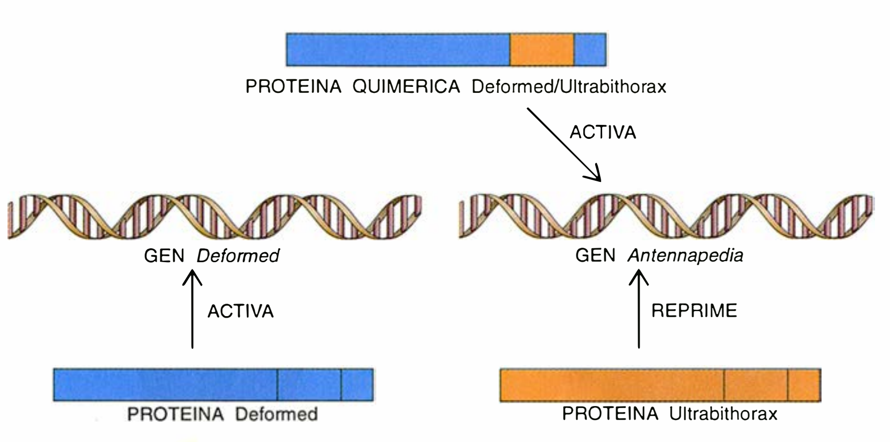




5. EXPRESION del gen *Deformed* en embriones de mosca, revelada por la tinción marrón; suele estar restringida a una banda de células que se convierten en estructuras cefálicas posteriores (*a la izquierda*). Los embriones con genes *Deformed* transferidos mediante ingeniería producirán la proteína Deformed en todas las células del organismo tras una breve exposición al calor (*derecha*). Las anomalías del desarrollo permiten inferir la función del gen *HOM*.

meodominio de la proteína HoxB6 del ratón son casi idénticas (difieren sólo en cuatro posiciones de 61); significa ello que estas dos proteínas se parecen entre sí más de lo que Antennapedia se parece a cualquier otra proteína HOM de la mosca. Desde un punto de vista evolutivo, esta información sugiere que *HoxB6* y *Antennapedia* son homólogos estructurales —esto es, descienden de un gen ancestral común diferente del que dio lugar, pongamos por caso, a *Abdominal-B* o *Deformed*.

Siguiendo el mismo razonamiento, la similitud entre el complejo *HOM* y los complejos *Hox* indica que el antepasado común más reciente de *Drosophila*, el ratón y los seres humanos —una criatura con aspecto de gusano que vivió, más o menos, hace unos 700 millones de años— tenía un protocomplejo de genes con secuencia homeótica de la clase *Antennapedia*. El tipo y la disposición exactos de los genes en ese complejo siguen siendo un misterio. Sin embargo, guiándonos por los complejos *HOM* y *Hox* actuales podemos estar seguros de que ese protocomplejo primitivo contenía homólogos estructurales de *labial*, *proboscipedia*, *Deformed*, *Antennapedia* y *Abdominal-B*. Esta visión general de la evolución de los genes *HOM* y *Hox* está sustentada firmemente por la investigación que Richard W. Beeman y Rob E. Denell han realizado sobre los genes homeóticos del escarabajo; lo corroboran publicaciones recientes de muchos laboratorios, que demuestran que el gusano primitivo *Caenorhabditis elegans* también tiene un complejo *HOM*, aunque remota, claramente emparentado con los complejos *HOM* de *Drosophila* y *Hox* de vertebrados.



6. LAS DIANAS GENETICAS de las proteínas con homeodominio están determinadas en buena medida por las regiones del homeodominio de dichas proteínas. Por ejemplo, una proteína quimérica Deformed que lleva un homeodominio Ultrabithorax actúa sobre los mismos genes que lo hace Ultrabithorax. Sin embargo, el efecto regulador de la quimera —activación— se asemeja más al de Deformed debido a las regiones de la proteína situadas fuera del homeodominio.

Todo este respaldo estructural, aunque sugerente, no nos permite aún afirmar de manera tajante que las proteínas HOM y Hox cumplen la misma función durante el desarrollo de los embriones. No se olvide que los complejos génicos de la mosca y el ratón han estado en diferentes linajes evolutivos durante cientos de millones de años, con tiempo de sobra para desarrollar capacidades nuevas o divergentes. Por tanto, las semejanzas de estructura y expresión podrían ser caprichos históricos y no indicadores fieles del parecido funcional entre las proteínas HOM y Hox actuales.

Una manera de abordar el problema es explorar los efectos biológicos de los genes *Hox* en embriones de vertebrados y compararlos con lo que se conoce acerca de los efectos de los genes *HOM* en invertebrados. Por ejemplo, ¿causa transformaciones homeóticas la activación ectópica o la inhibición específica de la función de un gen *Hox* durante el desarrollo del ratón? En busca de una respuesta, el equipo de Peter Gruss creó cepas de ratones cuyos embriones producen proteína HoxA7 en la cabeza y en la región cervical anterior. La proteína HoxA7 (que es similar a las proteínas Antennapedia y Ultrabithorax del complejo *HOM*) abunda en las regiones cervical posterior y torácica anterior y está ausente de las regiones más anteriores. Algunos ratones en los que *HoxA7* se expresa anormalmente desarrollan deformidades en el oído y el paladar y, en algún caso, presentan transformaciones homeóticas de las vértebras cervicales.

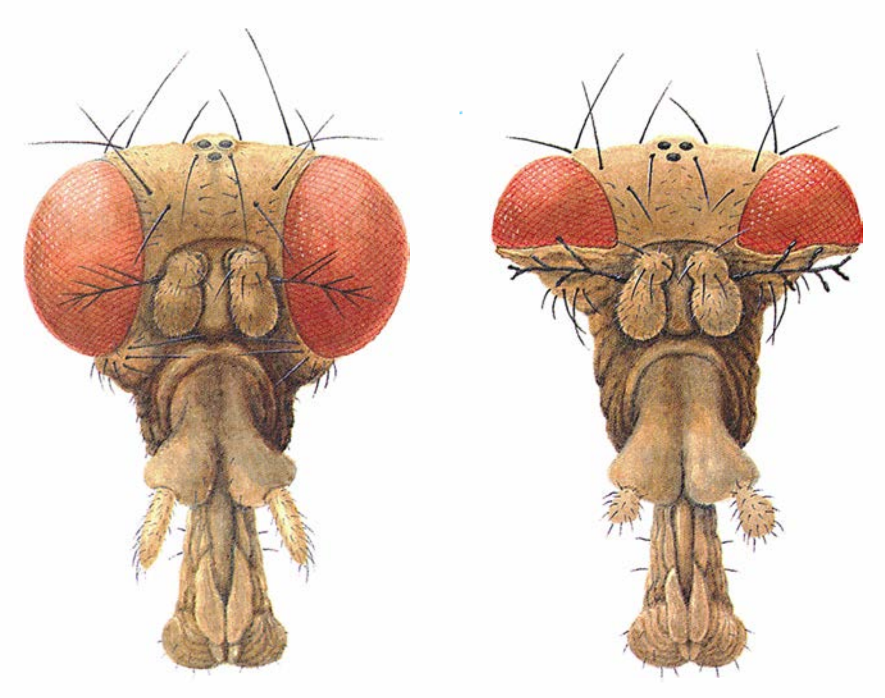
El experimento inverso, muy delicado, consiste en bloquear la función de un gen *Hox*. Osamu Chisaka y Mario R. Capecchi lo han acometido para *HoxA3*, y Thomas Lufkin y Pierre Chambon para *HoxA1*. Han demostrado que algunas estructuras de las regiones anteriores del embrión de ratón dependen de esos genes. La mutación del gen *HoxA3* origina ratones, que mueren al poco de nacer con un complejo conjunto de deformidades en cabeza y cuello (estructuras óseas anómalas en el oído interno y cara y ausencia de timo).

Tales deformidades recuerdan el síndrome de DiGeorge, una enfermedad congénita humana, lo que abre la esperanza de que el estudio de los genes *HOM* y *Hox* nos lleve a entender defectos hereditarios del hombre. Habrá que avanzar mucho más antes de desentrañar la participación de los genes *Hox* en el diseño del desarrollo de ratones y humanos. Pero los experimentos mencionados, y otros que se están incoando, confirman que los genes *Hox* y *HOM* desempeñan misiones similares.

En nuestro laboratorio nos propusimos abordar una comparación directa, comprobando si las proteínas Hox pueden ocupar el lugar de las proteínas HOM en el desarrollo embrionario de *Drosophila*. En teoría, conseguiríamos el intercambio con la sustitución del gen *HOM* de una mosca por su homólogo *Hox*; éste se expresaría cuando y donde lo hubiera hecho el gen *HOM*. Pero no podemos acometer todavía un experimento así; la técnica actual no puede abarcar y manipular genes enteros. Pero sí pudimos aproximarnos al ideal: usando secuencias de ADN de *Hox* unidas a elementos reguladores inducibles por calor, logramos que todas las células de una mosca en desarrollo expresaran una proteína Hox.

La primera proteína que sometimos a este tipo de prueba, con Nadine McGinnis, fue HOXD4, proteína humana equivalente a la HoxD4 de ratón. (De acuerdo con la nomenclatura genética normalizada, la abreviatura Hox se escribe con mayúsculas al referirse a los genes humanos.) El gen que codifica esta proteína humana, que tiene un homeodominio semejante al de la proteína Deformed de la mosca, fue aislado y caracterizado en 1986 por Fulvio Mavilio y Edoardo Boncinelli.

En *Drosophila*, cuando el gen *Deformed* se expresa fuera de sus límites normales en el eje antero-posterior, provoca anomalías cefálicas, como ausencia de la porción ventral de los ojos. Ante nuestro asombro, la expresión de la proteína humana HOXD4 en las células de la mosca en desarrollo causa las mismas deformidades. Sin embargo, no pudimos



7. LAS MOSCAS MUTANTES *DEFORMED* exhiben varias anomalías en la cabeza, entre ellas la ausencia de la mitad inferior de los ojos compuestos. Las mismas deformidades pueden inducirse haciendo que las larvas expresen la proteína HOXD4.

atribuir estos cambios enteramente a la proteína humana: nuestros experimentos indicaban que esta proteína también instaba la expresión del gen *Deformed* de la mosca. (Recordemos que un efecto normal de la proteína Deformed es activar su propio gen, en lo que constituye un ciclo de retroalimentación positivo.) La proteína humana HOXD4 remedaba, pues, los efectos de la expresión inadecuada de *Deformed*, ya que —al menos en parte— *promovía* la expresión impropia de *Deformed*. Pese a todo, pudimos comprobar que HOXD4 actuaba como una réplica, débil pero específica, de su homólogo de *Drosophila*.

Alentado por este resultado, Jarema Malicki examinó la función de la proteína de ratón HoxB6 durante el desarrollo de la mosca. La proteína HoxB6, que Klaus Schughart y Frank H. Ruddle identificaron y caracterizaron, tiene un homeodominio muy similar al de la proteína Antennapedia. Los efectos de la expresión de la proteína HoxB6 en las células de la mosca durante su desarrollo eran espectaculares e inconfundiblemente homeóticos. En las larvas de *Drosophila* la proteína HoxB6 hizo que gran parte de la región cefálica se desarrollara como si fuera torácica: en vez de un esqueleto larvario cefálico, las moscas transformadas producían cinturones de dentículos, filas de espínulas habitualmente dispuestas en la parte ventral del tórax de *Drosophila*. En los adultos de *Drosophila*, HoxB6 producía la transformación homeótica de las antenas en patas torácicas. Ya fueran larvarias o adultas, las transformaciones homeóticas eran muy similares a las producidas por la expresión inadecuada de la proteína Antennapedia en todo el cuerpo.

¿Qué cabe deducir de estos experimentos sobre intercambio de genes entre especies? En primer lugar, refuerzan nuestras conclusiones de que los propios homeodominios determinan gran parte de la especificidad reguladora de las proteínas: fuera de la región del homeodominio, las proteínas homólogas de moscas y vertebrados tienen poco en común. Además, los experimentos sugieren que, desde una óptica funcional, las proteínas homólogas son, hasta cierto punto, intercambiables y tienen "significados" similares para los embriones durante sus fases iniciales de desarrollo. El sistema para determinar la posición en el eje anteroposterior ha cambiado poco en los últimos 700 millones de años.

Si asociamos a un rompecabezas la complicada red de interacciones entre las proteínas encargadas de regular los genes dentro de un organismo, las proteínas homólogas de mosca y mamíferos serían piezas que encajarían en los mismos sitios. Planteándonos así el sistema *HOM/Hox*, se pone de relieve también todo lo que nos queda por aprender todavía: hemos de identificar aún las otras piezas del rompecabezas que permiten a las proteínas HOM y Hox regular genes y cumplir una función específica.

En cierto sentido, estos experimentos nos retrotraen también a las observaciones clásicas de Karl Ernst von Baer, quien en los años veinte del siglo pasado llegó a la conclusión de que, si se examinaba la morfología de embriones en sus primeras etapas de desarrollo, las formas de todos los vertebrados parecían converger en un diseño común. La historia, demasiado bonita para ser cierta, nos cuenta que von Baer llegó a esta conclusión cuando se cayeron las etiquetas de las botellas donde conservaba los embriones y descubrió con disgusto que no podía estar seguro de si correspondían a lagartos, pájaros o mamíferos. La estructura y la función de los sistemas génicos *HOM* y *Hox* sugieren que esta convergencia del desarrollo abarca las primeras fases de muchas especies animales diferentes; pero tal convergencia de embriones dispares sólo puede "verse" en su nivel molecular.

En algún momento del intervalo que media entre hace 600 millones y mil millones de años, se desarrolló el sistema *HOM/Hox*. Ha resultado tan útil, que muchos animales han dependido desde entonces de la capacidad del mismo para determinar la posición axial durante el desarrollo. ¿Es el único sistema genético de desarrollo que se ha conservado? Parece improbable. Se han encontrado indicios de que otros genes reguladores de ratón y de mosca presentan estructura muy similar y son activados en el mismo tejido o en tejidos homólogos. La exploración de las funciones de estos nuevos genes y de su interacción con el sistema *HOM/Hox* promete revelar muchos más descubrimientos fascinantes sobre la evolución y el funcionamiento de los primitivos sistemas genéticos, auténticos arquitectos moleculares del plan corporal de los animales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOMEOBOX GENES AND AXIAL PATTERNING. William McGinnis y Robb Krumlauf en *Cell*, volumen 68, número 2, páginas 283-302; 24 de enero de 1992.

THE MAKING OF A FLY: THE GENETICS OF ANIMAL DESIGN. Peter A. Lawrence. Blackwell Scientific Publications, 1992.

THE MOUSE *HOX-1.3* GENE IS FUNCTIONALLY EQUIVALENT TO THE *DROSOPHILA* SEX COMBS REDUCED GENE. J. J. Zhao, R. A. Lazzarini y L. Pick en *Genes and Development*, volumen 7, número 3, páginas 343-354; marzo de 1993.

Perfiles

Tim Beardsley

BRUCE M. ALBERTS: *El papel de la Academia*

La Academia Nacional norteamericana de Ciencias con sede en Washington es un auténtico templo del saber. El Salón Principal, con su cúpula afiligranada, es testigo mudo de las decisiones de los santones de la ciencia. En los despachos y oficinas que rodean el Salón se preparan informes sobre la situación de los proyectos científicos y su incidencia en la sociedad que los financia. En la Academia, una institución que comenzó su singladura cuando Abraham Lincoln habitaba la Casa Blanca, acaba de entrar una bocanada de aire fresco.

Profesor de bioquímica y biofísica en la Universidad de California en San Francisco, Bruce M. Alberts ha embarcado a los sacrosantos despachos en una frenética actividad con la informalidad propia de los ribereños del Pacífico.

A sus 54 años, goza de un bien ganado prestigio por su investigación sobre la intervención de las proteínas en la replicación de los cromosomas. Cuando llegó a Washington, hace trece años, era una incógnita, pues no había ocupado ningún puesto de rango en la ciencia. Tampoco fue el primero en quien pensaron los miembros del comité encargado de encontrar un sucesor a Frank Press, un geofísico que presidió la Academia durante dos mandatos consecutivos de seis años, desde 1981.

A pesar del sobresueldo de 250.000 dólares y del apartamento en Watergate, entre otras sinecuras inherentes al cargo, renombrados científicos con más experiencia administrativa que Alberts declinaron figurar en la lista de candidatos.

Para Donald D. Brown, del departamento de biología de la Institución Carnegie, Alberts reunía las condiciones del perfil exigido, por ser un científico en activo con amplia experiencia y con una elogiosa labor como director de su departamento en San Francisco. Y Alberts, señala Brown, era un enérgico presidente de la comisión de ciencias de la vida en el Consejo Nacional de Investigación. Además, había estado detrás del Proyecto Genoma Humano.

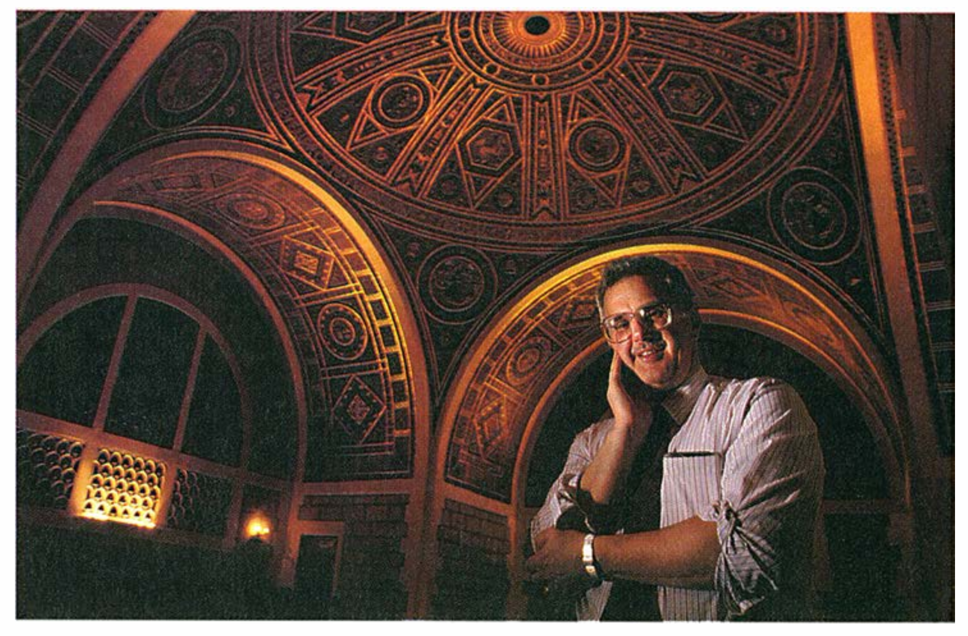
Si Alberts no era la primera opción de la Academia, tampoco él tenía a la Academia en su punto de mira. “Me encontraba muy a gusto en el laboratorio. Mi imagen de directivo era negativa”, explica, sin perder el aire de científico de a pie. Por muy elogiosa que fuera su tarea, no le gustó el puesto de presidente de su departamento, y pensó que la Academia sería más de lo mismo. Pero algunos amigos le hicieron reconsiderarlo. Capituló, apunta, cuando se dio cuenta de que a la cabeza de la institución “podría hacer cuatro o cinco cosas que de otra manera no llegaría a realizar”. La mayoría de estas cosas resultan ser variaciones de la principal preocupación de Alberts: la educación.

Su carrera investigadora tuvo un comienzo brioso, cuando hizo un importante descubrimiento acerca de la estructura del ácido ribonucleico mientras preparaba su tesina, en Harvard, por los años cincuenta. El éxito prematuro le indujo a dedicarse a la investigación, sacrificando la carrera de medicina. Tras una temporada en la Universidad de Princeton se marchó a California.

Fue allí donde pudo dar cumplimiento a su afán de promover la información científica. Disfruta hablando del Consorcio de Educación Ciencia/Salud de la Universidad de California en San Francisco. El programa es una colaboración en la cual científicos y maestros trabajan para renovar las enseñanzas de las ciencias.

Le atrae la idea de acometer una iniciativa similar que abarcara el país entero. Afirma que “la carencia de un liderazgo nacional, que podría cubrir la Academia, constituyó una razón de peso para aceptar este trabajo”. Los proyectos de Alberts son vertiginosos por su audacia. Pretende involucrar en su campaña no sólo a la Academia, sino también a buena parte de la comunidad científica del país. “No estoy hablando de retocar el sistema; pienso en un cambio drástico. Podemos usar la educación como punta de lanza para reformar el sistema, para capacitar a los maestros y que cambie lo que hoy es la escuela pública”.

La tarea no parece menor.



BRUCE M. ALBERTS se despacha a gusto en el Salón Principal de la Academia Nacional de Ciencias. ¿Puede un deslenguado abrirse camino en los pasillos del poder?

Pero Alberts confía en que los científicos le secundarán y que empeñarán su "tremenda reserva de energía y de agudeza y sus habilidades" en mejorar la educación. Al cabo de un par de meses desde que tomara posesión de su cargo, se reunió con el superintendente de las escuelas de Washington para establecer un proyecto piloto en la ciudad. Y en noviembre convocó a sus asesores para que le contaran del lanzamiento del proyecto RISE (siglas de Iniciativas Regionales de Educación Científica). RISE es un proyecto piloto con el que el Consejo Nacional de Investigación apoyará las colaboraciones entre los científicos y los maestros de escuela para promover el acercamiento a la ciencia.

La Academia está preparando también una normativa nacional para la enseñanza de la ciencia. Alberts ha hablado ya con el Secretario de Educación de la Administración Clinton, Richard W. Riley, sobre la introducción de una legislación que incentive a las escuelas públicas para que adopten esa regulación. Pero no es que haya carencias en la programación, asegura Alberts, al menos en los cursos elementales: "Es simplemente una cuestión de tener la capacidad de hacerlo y la voluntad de ponerse manos a la obra".

"No voy a tener ningún problema para encontrar científicos y médicos", confía. Pero reconoce que no todos están dotados para los consorcios educativos. "Hay científicos que me miran por encima del hombro", admite. Y dice que es consciente de los peligros de dejar que investigadores bien intencionados sermoneen a maestros y estudiantes acerca de sus especialidades. Recuerda a un edafólogo que insistía en que "hay ocho hechos que todo el mundo debería conocer sobre la ciencia del suelo". "Bueno —Alberts se ríe con ganas— yo, particularmente, no conocía ninguno, ¡y soy el presidente de la Academia!".

La guasa forma parte de su manera de ser. En la más pura tradición profesional, tiene también fama de distraído. Una vez dejó perplejo al personal de su oficina preguntándose en voz alta cómo iba a ser capaz de dirigir la Academia si era tan desorganizado que no podía encontrar sus propias gafas. Que esos defectos inocentes le ayuden en los hostiles pasillos del Congreso es harina de otro costal.

A pesar de su actitud relajada, Alberts no tiene pelos en la lengua. La Academia y el Consejo Científico, junto con la Academia Nacional de Ingeniería y el Instituto de Medicina, emplean a más de 1000 analistas políticos en Washington. "El número de asesores se ha disparado, y eso es un problema", denuncia con franqueza. Con ello, alimenta los rumores de que la Academia va a despedir a un gran número de ellos. Pero Alberts no quiere confirmar si, como se dice, habrá un recorte de personal de más del 20 por ciento en los próximos cinco años.

Como cualquier jefe de una institución, Alberts debe afrontar el problema de los ingresos. Aunque con Press el presupuesto de la Academia aumentó durante sus 12 años de mandato, 120 millones de dólares siguen siendo escasos para una organización de la talla de la Academia. La dotación es importante porque sólo usando sus propios fondos será capaz de iniciar estudios en otras áreas en las que el gobierno puede no solicitar asesoramiento (la Academia se fundó para ese fin, pero la demanda de estudios va de capa caída). La institución produjo el año pasado más de 200 informes, la mayoría, aunque no todos, encargados por ministerios o instituciones federales.

En otro frente, el nuevo presidente también ha tomado medidas en sus primeros seis meses para atajar las dudas sobre la imparcialidad de los estudios del Consejo de Investigación. Como los informes se elaboran de manera independiente, los organismos del gobierno buscan la "bendición" de la Academia. Pero los miembros de la Academia se han quejado, confiesa Alberts, de que el personal del Consejo de Investigación ha permitido en ocasiones que los ministros influyeran en los informes, lo que va en contra de las reglas de la Academia.

"Hemos convertido el magisterio en una profesión en la que es imposible el trabajo bien hecho a no ser que uno tenga madera de mártir"

Una fuente del congreso cita como ejemplo cierto estudio del Consejo de Investigación sobre el Sistema de Inspección Terrestre, un programa federal de detección remota por satélite. Las críticas al sistema vertidas en un estudio del Consejo de Investigación fueron silenciadas tras las objeciones del gobierno, que tuvo acceso a los borradores. Se dice que también se resintieron del tráfico de influencias y amiguismo con terceras partes informes para la Guardia de Costas y el Departamento de Marina y estudios sobre política agrícola.

Alberts ha emprendido "una revisión a fondo del proceso de supervisión de propuestas" para fortalecer las deliberaciones sobre los criterios de los estudios y para resaltar la responsabilidad de los miembros del Consejo de Investigación. Finalmente, va a procurar dar un carácter más colegial y eficiente al Consejo de Investigación "rompiendo las barreras institucionales que impiden que la gente colabore con los demás".

En su condición de responsable público de la ciencia, Alberts se explaya en una argumentación iniciada por Press: que los científicos deben darse cuenta de que pedir más y más dinero puede haberles hecho vulnerables a las acusaciones de egoísmo que corren en el Capitolio. Para solventar este problema, Alberts está intentando establecer relaciones con miembros del Congreso y sus asistentes.

Ha consultado también a la Casa Blanca sobre el plan, recientemente anunciado, de crear un Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con el que la administración pretende controlar más de cerca la investigación financiada por el gobierno. "Debemos mostrarnos dispuestos a orientar a nuestros estudiantes hacia un abanico más amplio de carreras". Si no, "no deberíamos formar el número de doctores en física y en química que actualmente estamos poniendo en la calle".

Uno de los mayores retos, apunta, es el de derribar las barreras que impiden que personas con buenas cualidades científicas —entre ellos, los trabajadores de defensa en el paro— entre en nuevos campos, como la educación, el tema al que vuelven una y otra vez los pensamientos de Alberts. "Hemos de intentarlo, o, al menos, conseguir que sea una salida atractiva", declara. Un enfoque que goza de sus simpatías es el desarrollo de cursos específicos para enseñar pedagogía de la ciencia.

Alberts no es ajeno a las cargas que conlleva la enseñanza. Su hija, profesora de ciencias, igual que muchos de sus colegas, tiene que comprar material didáctico con su propio sueldo. "Hemos convertido el magisterio en una profesión en la que es imposible el trabajo bien hecho a no ser que uno tenga madera de mártir", dice. Si consigue salirse con la suya, la tendencia podría invertirse. Los educadores, al igual que los investigadores, podrían resultar beneficiados de la nueva irreverencia en el santuario de la ciencia.

Ciencia y sociedad

Aceleradores

Para reactores nodriza de torio

A finales del año pasado, un grupo de físicos del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas sito cerca de Ginebra, despertó un interés considerable en los medios de comunicación al resucitar la idea de utilizar aceleradores de protones para alimentar reactores nodriza que empleen torio como combustible primario. El atractivo de tales reactores reside en que producen electricidad sin consumo de combustible fósil (petróleo y gas natural) y sin liberar gases que contribuyan al efecto invernadero.

De hecho, la presente generación de reactores nucleares ya permite lo anterior; y así podríamos seguir otros cien años por lo menos con las reservas conocidas de uranio-235. Tal isótopo constituye sólo el 0,7 % del uranio natural. Enriquecido éste en uranio-235 hasta un 3 % o 4 %, es el material fisionable habitual de los actuales reactores nucleares dedicados a la producción comercial de energía eléctrica. Los reactores nodriza, lo aclararemos en seguida, podrían centuplicar las reservas de material combustible, si emplearan el ciclo uranio-plutonio (U-Pu), y multiplicarlas por mil, si optaran por el ciclo torio-uranio (Th-U). Serían suficientes las presentes reservas de torio para cubrir las necesidades energéticas actuales durante los próximos 10^5 años. Ahora bien, para llevar adelante esta forma de producir energía, sería necesario que la sociedad confiase más en la seguridad de los reactores nucleares y en el almacenamiento conveniente de los residuos radiactivos que producen.

En los reactores nodriza, el combustible principal, o material fértil, no es por sí mismo fisionable; adquiere dicha condición cuando se transforma mediante la absorción de neutrones producidos en la propia reacción nuclear de fisión, una vez comenzada ésta. Veamos cómo. Materiales fértiles bastante comunes son el uranio-238, que constituye el 99 % del uranio natural, y el torio-232, que abunda en la naturaleza. El uranio-238 se convierte en uranio-239 por captura de un neutrón; el U-239, con una vida media de 23 minutos, se desintegra en neptunio-239, y éste, a su vez, con una vida media de 2,4 días, se desintegra en plutonio-239, isótopo que sí es fisionable. Hasta aquí, el ciclo uranio-plutonio. Vayamos con el ciclo torio-uranio. Se parte, como material fértil, del torio-232, isótopo que se transforma, por captura de un neutrón, en torio-233. Th-233, con una vida media de 22 minutos, se desintegra en protoactinio-233; con una vida media de 27 días, éste se desintegra a su vez en uranio-233, que sí es fisionable. Importa saber que, aunque los procesos que dominan son los anteriores, se producen también, en cantidades apreciables, otros isótopos del material fisionable: plutonio-240 y plutonio-241, etcétera, en el ciclo U-Pu, y uranio-234, uranio-235, etcétera, en el ciclo Th-U, así como varios elementos transuránicos.

De los reactores actuales se dice que son "críticos" porque, para mantener la fisión, basta con los neutrones producidos en la misma. Pero podrían diseñarse reactores nucleares que operen de forma "subcrítica", con los neutrones adicionales necesarios para mantener la reacción en cadena obtenidos a partir de las reacciones de espalación, iniciadas por protones provenientes de un acelerador. Esta forma de mantener la reacción nuclear podría suponer un importante avance en la seguridad del reactor. Además, los neutrones sobrantes producidos por el acelerador permitirían una mayor flexibilidad en las condiciones de operación; podríamos, por ejemplo, aprovechar una fracción de los mismos para "incinerar" los residuos radiactivos formados en el reactor, convirtiéndolo así en un reactor "limpio".

"Incinerar" significa transformar los isótopos radiactivos en material estable, en uno o en varios pasos consecutivos. Los desechos radiactivos se dividen en dos clases: "fragmentos de la fisión" y "actínidos". Los fragmentos de la fisión, residuos que quedan al fisionarse los núcleos, constituyen el grueso del material radiactivo con vidas medias del orden de algunos cientos de años. Los actínidos, por su parte, son elementos transuránicos emergidos en las sucesivas capturas de neutrones; constituyen el grueso del material radiactivo de una persistencia temporal mucho mayor. Los reactores nodriza alimentados por un acelerador podrían, en teoría, incinerar ambos tipos de residuos radiactivos, además de generar electricidad; y de ellos se habla, en efecto, como máquinas para producir energía eléctrica segura, limpia y barata, por tiempo indefinido.

El tema de los reactores nodriza alimentados por aceleradores viene considerándose desde los años sesenta. Por lo común, suele pensarse en un acelerador de protones de una energía de mil millones de electronvolts. En el centro del reactor habría un blanco de algún elemento pesado, plomo por ejemplo, o un material fértil, como el torio o el uranio. Cada protón, al alcanzar el blanco, produce unos 30 neutrones, que se multiplicarían a lo largo de las fisiones producidas, lo mismo que en un reactor común. Sin embargo, toda la operación podría ejecutarse sin llegar al umbral de "criticidad", dejándola, supongamos, en un 95 % de criticidad, lo cual correspondería a que cada neutrón de los producidos por el acelerador diese lugar a unas 20 fisiones. Este factor de multiplicación no puede ser muy bajo, ya que entonces la mayor parte de la energía generada debería destinarse a la alimentación del acelerador, que se supone funciona con un rendimiento en torno al 50 %. Para un reactor normal de una potencia de un gigawatt de energía eléctrica, el haz del acelerador tendría que tener una corriente de 50 miliampères. Esta cifra, aunque supera de lejos lo conseguido hasta ahora, no es inverosímil. Habría que destinar alrededor del 10 % de la potencia eléctrica generada al funcionamiento del acelerador, con la pérdida correspondiente del rendimiento global.

Un grupo, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, propuso en 1992 un proyecto muy ambicioso (C. D. Bowman et al. *Nuclear Instruments and Methods* A320 [1992], 336). Su reactor nodriza, basado en el ciclo Th-U, quema sus propios residuos, tanto los fragmentos de fisión como los actínidos. Requiere un flujo muy intenso de neutrones para producir una potencia de un gigawatt de electricidad: alrededor de 10^6 neutrones

térmicos (lentos) por centímetro cuadrado y por segundo.

El reactor se asemeja a una cebolla de cuatro catafilos. La capa más interna, de plomo fundido, sirve de blanco para los protones. La rodea otra capa que contiene los residuos producidos, disueltos en agua pesada; allí se incineran. El agua pesada actúa de moderador de neutrones, al rebajar la energía de éstos hasta niveles térmicos. La escasa cantidad de calor liberada en estas dos capas no es aprovechada para producir electricidad. En la tercera capa, que opera a unos 700 grados C y donde se encuentra el uranio fisionable tras haberse separado del torio del que procede, se genera energía térmica. El uranio, que se halla disuelto en una mezcla eutéctica de sales fundidas de fluoruro de litio y fluoruro de berilio, sirve de refrigerante y de líquido del cual se extrae el calor. La última capa contiene el material fértil, torio disuelto en agua pesada. Se requeriría un reprocesamiento químico frecuente de las tres últimas capas, para separar los diferentes elementos que se transforman sin cesar. La instalación se parecería más a una planta química que a un reactor nuclear actual. Además del trabajo de investigación y desarrollo que demanda la consecución de un acelerador así, habría que empeñarse en resolver otros problemas técnicos muy complejos. Pero, si con todo se lograra construir esa planta, produciría electricidad con un mínimo de residuos radiactivos y casi por tiempo indefinido.

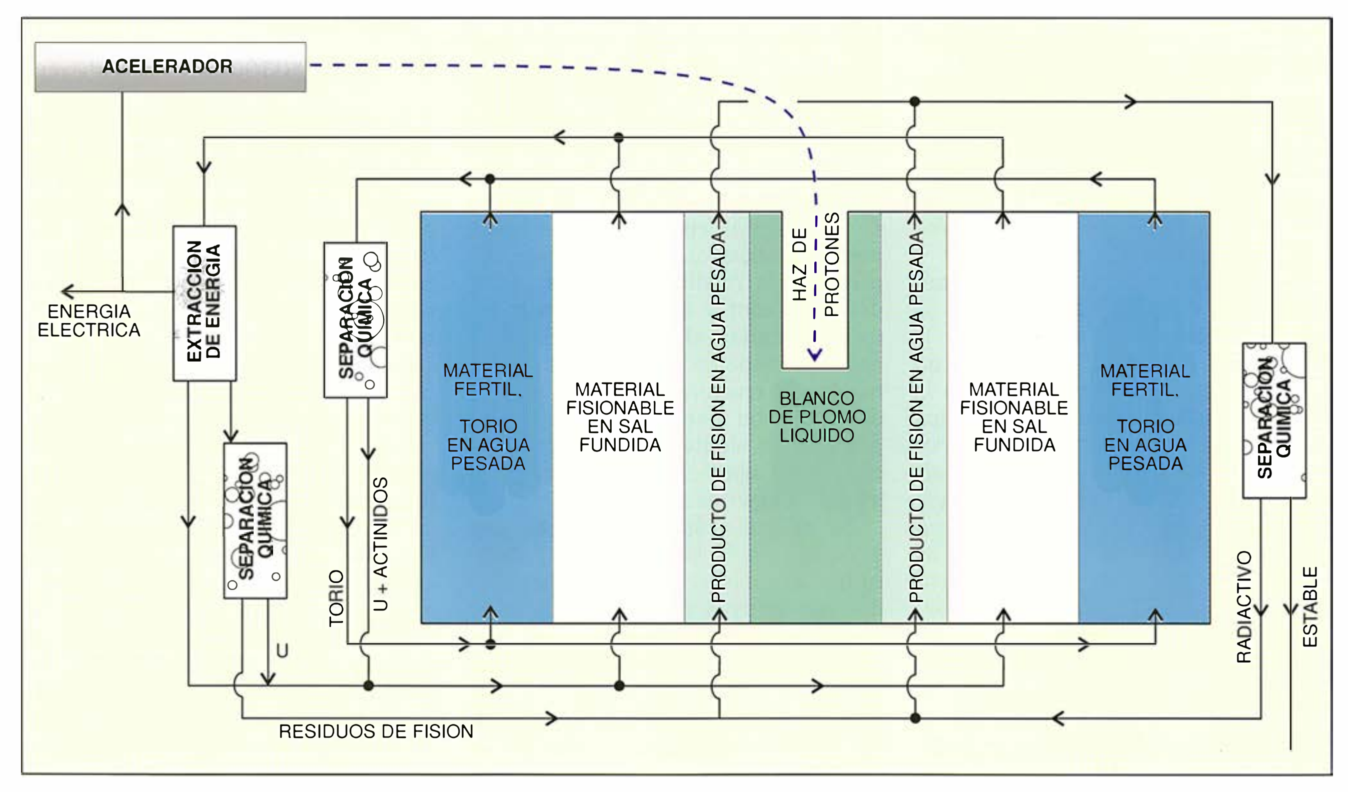
Traigamos a colación otros reactores nodriza alimentados por un acelerador, propuestos con parámetros muy distintos en lo concerniente al tamaño de la instalación (que se mide por la energía eléctrica producida), material blanco para los protones, energía de los neutrones (secundarios, rápidos, epitérmicos o térmicos), clase de material moderador y material refrigerante. El grupo del CERN (C. F. Carminati et al., *Report CERN* AT/93-47/ET) ha ideado dos versiones, que difieren entre sí por la clase de blanco para los protones y material refrigerante y se parecen en lo demás. Generarían una energía eléctrica modesta, unas veinte veces menor que la de un reactor convencional. La consiguiente menor demanda de corriente protónica en el acelerador permitiría aprovechar la tecnología de los actuales aceleradores de partículas. El régimen de energía neutrónica sería epitérmica, esto es, algo por encima de la energía térmica.

Una de las versiones se aproxima bastante a los actuales reactores de agua ligera presurizada. Se emplea de combustible una mezcla de aproximadamente 93 % de torio, con isótopos fisionables de uranio producidos a partir del torio, que vienen a representar en torno al 7 % restante. La mezcla sirve, a la vez, de material fértil, fisionable, y de blanco para los protones. Se emplea agua ligera a una presión de 150 atmósferas y a una temperatura de 300 grados centígrados como refrigerador, que desempeña también la función de moderador de los neutrones.

La otra versión propone un enfriamiento por gas (dióxido de carbono o argón) y una mezcla eutéctica de plomo y bismuto como blanco de los protones; además, empaqueta juntos en pequeñas esferas metálicas el material fértil (torio), el uranio fisionable y el carbono moderador.

En ninguna de las dos versiones del CERN se pretende quemar los residuos radiactivos. Aducen, para ello, que los fragmentos de la fisión, dominantes en la radiactividad emitida en los primeros cientos de años, pueden almacenarse y gestionarse en superficie durante ese período, en tanto que los actínidos, de vida media muy dilatada, sólo se producirían en cuantía muy pequeña en comparación con los generados por los reactores nucleares actuales. Los materiales fértiles y fisibles sólo necesitan reprocesarse una vez cada pocos años.

Resulta evidente que los modelos del CERN son bastante más fáciles de abordar que la propuesta del equipo de Los Alamos; también revisten menor interés, porque no se esfuerzan en



Vista esquemática de los componentes de la propuesta de reactor nodriza alimentado por un acelerador hecha por el grupo de Los Alamos. Este reactor nodriza quema al mismo tiempo sus propios residuos radiactivos

evitar los residuos nucleares y la potencia producida es menor también. Serían necesarias unas 1000 instalaciones de este tipo para igualar la potencia nuclear generada por los 50 reactores de agua ligera presurizada que Francia posee en la actualidad.

Merece la pena detenerse en los puntos básicos de tales propuestas, y en concreto en la seguridad, la limpieza, la duración y el coste de las instalaciones.

1. *Seguridad*. Constituye uno de los principales motivos de preocupación en torno a las instalaciones nucleares actuales. Los dos accidentes más graves acontecidos ilustran las dos clases de problemas involucrados: Chernobil es un ejemplo de salida supercrítica y Three Miles Island lo es de la fundición del núcleo del reactor por un fallo en los circuitos de refrigeración, aun cuando el reactor no se encontraba ya en estado crítico. Para los reactores subcríticos antes examinados, el primer tipo de accidente resulta mucho menos probable, aunque importa señalar que también se requiere cierto nivel de control para hacer frente a un posible estado crítico; en efecto, estos reactores operan muy cerca de la criticidad, y las variaciones locales durante el funcionamiento, en virtud de las continuas variaciones en la producción de material fisible y en la acumulación de fragmentos de fisión, pueden producir un estado crítico. El peligro debido a un fallo en el material refrigerador es, en principio, el mismo que el de los reactores actuales.

2. *Peligro de proliferación de armas nucleares*. Los reactores actuales originan grandes cantidades de plutonio. Cabría suponer que se empleara en la fabricación de armas nucleares. Pero los reactores comerciales producen una mezcla de plutonio-239 y otros isótopos del plutonio. En contraste con el plutonio-239 puro, la mezcla es muy poco atractiva para la fabricación de armas. Por tanto, no está claro que asome el peligro de la proliferación armamentística por culpa de la existencia de dicha mezcla. Por lo que nosotros sabemos, ningún país que posea arsenal atómico, o haya intentado crearlo, lo ha hecho a través de los residuos comerciales de plutonio, a pesar de que la mayor parte del plutonio mundial está contenido en dichos residuos.

En lo que concierne a los reactores nodriza, el material potencial para armas atómicas, uranio en el ciclo Th-U o plutonio en el ciclo U-Pu, se halla también mezclado con isótopos no deseables; además, al tratarse del elemento combustible del reactor, nunca pasa a ser residuo desechable. Ahora bien, sí hay un buen montante del mismo en cualquier momento del ciclo. En el ciclo Th-U, el uranio podría diluirse con uranio-238 para impedir su empleo en la fabricación de armas, pero a expensas de introducir en el ciclo el plutonio producido a partir del uranio-238. También habría menos plutonio que en los reactores convencionales con el ciclo de U-Pu, quizá la quinta parte, suficiente no obstante para constituir un peligro.

El reprocesamiento, con la consiguiente separación química del material fisionable, es un paso inevitable en cualquier ciclo de un reactor nodriza. Aunque no sea muy atractivo para fabricar bombas, este material representaría cierto riesgo de proliferación y requeriría tomar sus precauciones.

3. *Residuos radiactivos*. Los reactores nodriza alimentados por aceleradores pueden diseñarse de suerte tal que destruyan sus propios residuos; en ese camino está el modelo de Los Alamos. La cantidad de radiactividad existente dentro de la instalación en un momento dado, básicamente la emitida en el reactor y en las plantas de reprocesado químico, es notable, pero cualquier otro residuo radiactivo estaría limitado al material acumulado por falta de eficacia en el reprocesado.

4. *Costo de la energía eléctrica*. ¿Podría generarse energía eléctrica mucho más barata que la actual, habida cuenta de que la materia prima no cuesta? No es muy probable que así sea; de hecho podría esperarse lo contrario. En los actuales reactores nucleares, el importe del combustible, uranio enriquecido, constituye sólo alrededor del 15 % del coste total de la electricidad producida. El ahorro en el material combustible no sería, pues, significativo. Por otra parte, las pérdidas de rendimiento y los gastos del acelerador y de su funcionamiento aumentarían el coste de electricidad con respecto a la presente generación de reactores. Con los precios de saldo con que se compra hoy el petróleo, ni siquiera los reactores nucleares en operación son económicamente competitivos.

En nuestros días, el empeño que se ponga en la investigación y desarrollo de reactores nodriza alimentados por aceleradores debe fundarse en consideraciones ecológicas: una opción alternativa al uso de petróleo y gas natural, o carbón, para la producción de electricidad. Sumados a las medidas de ahorro energético y fomento de estrategias para aprovechar energías alternativas, los reactores nodriza alimentados por aceleradores constituyen una importante posibilidad para acabar con el derroche de gas natural y de petróleo, así como para reducir la emisión de gases que contribuyen al efecto invernadero. No debiera retrasarse la profundización en esta línea, ya que tanto el tiempo necesario de investigación y desarrollo como la duración de las reservas disponibles de gas natural y petróleo se miden en décadas. Los fondos asignados para investigación y desarrollo de esta tecnología brillan hoy por su ausencia casi total, lo mismo en los Estados Unidos que en Europa, Japón y la antigua Unión Soviética, siendo de ello principal culpable el bajo coste de la electricidad. Pero se trata, quizá, de una estrategia alicorta, considerada la reserva limitada de los pozos de gas y petróleo, incluso en una breve escala de tiempo. Hay razones de peso para buscar una energía nuclear limpia y segura, además de intensificar la investigación en fuentes renovables.

ENRIQUE FERNÁNDEZ
catedrático de física y director del Instituto de Física de Altas Energías de la Universidad Autónoma de Barcelona.

JACK STEINBERGER
premio Nobel de física y profesor de la misma disciplina en la Escuela Normal Superior de Pisa.

Fullerenos

Reactor español

En el Instituto Rocasolano de Química Física, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Madrid, se ha construido un reactor para la producción de fullerenos, moléculas así llamadas en honor del arquitecto R. Buckminster Fuller por la similaridad de las mismas con las cúpulas geodésicas que él diseñaba. Descubiertos en 1985, los fullerenos constituyen la tercera forma del carbono; las otras dos son el grafito y el diamante.

Todos los procedimientos de obtención de fullerenos descritos hasta la fecha están encaminados a producir la vaporización de átomos de carbono a partir de un espécimen de carbón sólido, generalmente grafito, o de un hidrocarburo líquido. Así, se obtienen fullerenos por ablación de carbono de un disco de grafito mediante irradiación de un láser pulsante y mediante calentamiento de carbón en hornos de alta frecuencia (microondas); también, a través de la recuperación de humos, obtenidos por calentamiento resistivo del grafito.

Además, se puede conseguir la vaporización de átomos de carbono a través del calor producido mediante un arco eléctrico, en el que se establece un flujo de corriente entre dos electrodos de grafito.

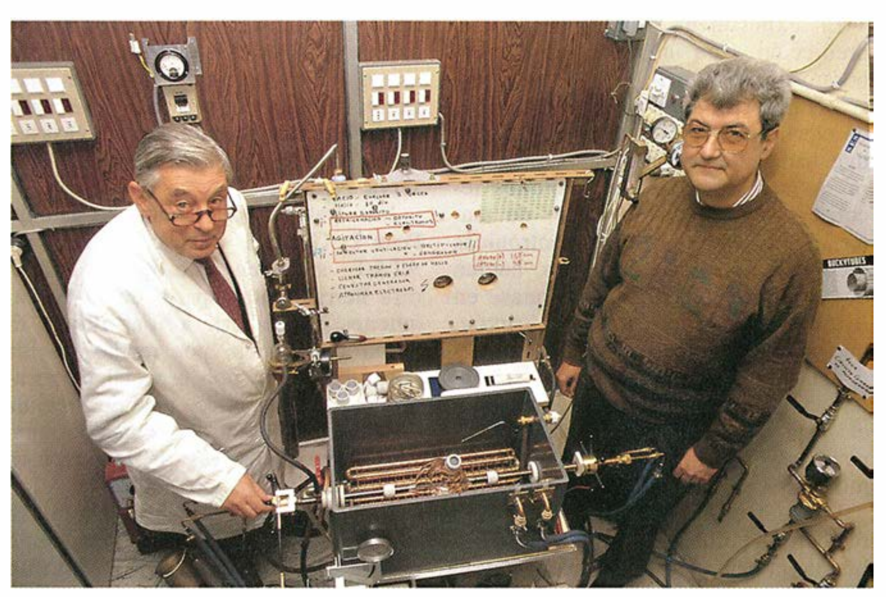
Los métodos mencionados se proponen obtener un conjunto de átomos de carbono en estado de plasma, dentro de un volumen controlado, cuya reorganización conduzca a la formación de las estructuras químicas tridimensionales cerradas, los fullerenos.

La máquina del Rocasolano produce fullerita, una mezcla de diferentes moléculas esféricas completas, cuya morfología recuerda la de una pelota de fútbol, junto con partes de estas mismas estructuras. Su rendimiento en C_{60} y C_{70}, todavía en experimentación, alcanza entre el 8 % y el 17 % en peso, respecto al grafito consumido.

El reactor se basa en una descripción de W. A. Scrivens y J. M. Tour, de la Universidad de Carolina del Sur. Como fuente de energía para la formación del arco eléctrico, emplea un sencillo grupo de soldadura de metales, al que se ha acoplado un puente rectificador de corriente de 80 ampères de intensidad. Este generador alimenta dos portaelectrodos de cobre refrigerados con agua, cuya misión es soportar, debidamente alineados y colocados, los electrodos de grafito, la materia prima para la producción de fullerenos.

El sistema de electrodos está confinado en un matraz de vidrio pyrex, diseñado para facilitar la extracción del hollín que contiene los fullerenos. Este material, que durante el proceso de producción se adhiere a las paredes del matraz, se recupera por dilución con tolueno. La energía suministrada al sistema produce un calentamiento que se disipa sumergiendo el conjunto en un depósito de agua refrigerada. El aparato se completa con una instalación para el suministro de un gas inerte, en nuestro caso helio, a presión controlada. La presencia del gas resulta decisiva, pues de su concentración depende probablemente el tiempo de residencia del carbono en el estado de plasma. Y de la duración del plasma depende, a su vez, el porcentaje de átomos de carbono que se reorganiza en fullerenos (rendimiento) y el de los que regresan al estado grafito, y se depositan conjuntamente como hollín en la pared fría del reactor de vidrio.

El rendimiento de fullerenos y su composición se subordina también a la distancia de separación de los electrodos de grafito, entre los que se hace saltar el arco eléctrico. Se obtiene un rendimiento óptimo con una separación próxima a un milímetro. El desgaste del electrodo correspondiente al ánodo debe compensarse por aproximación del correspondiente portaelectrodo de cobre, mediante un mecanismo electromecánico controlado por un sensor eléctrico que acciona un servomecanismo. En una primera versión más artesana se incluye una opción de control manual. La elección del procedimiento de obtención empleado en nuestro laboratorio se hizo teniendo en cuenta tanto el nivel de producción como el rendimiento, en el orden del gramo, suficiente para posteriores estudios quimicofísicos.



Reactor español para la fabricación de fullerita, con sus creadores José L. Laynez (izquierda) *y José L. Saiz* (derecha)

Se tuvo en consideración la facilidad de construcción y utilización con los medios generalmente disponibles en un laboratorio de química, así como su bajo costo, unas cien mil pesetas. A estas características se suma la sencillez en el control de los cuatro parámetros principales, que afectan al rendimiento y composición del producto final: flujo de helio, presión, potencia eléctrica y longitud del arco.

José L. Saiz y José L. Laynez
Instituto Rocasolano de Química Física, CSIC, Madrid.

Superconductores

¿Qué hacer con los defectos?

El empeño por lograr productos útiles a partir de superconductores de alta temperatura se ven frustrados ante la terquedad con que los materiales se niegan a dejar pasar sin resistencia la corriente en presencia de los intensos campos magnéticos. Creados éstos por causas externas o por la propia corriente sin resistencia, aparecen en diversas aplicaciones; en motores y generadores, por ejemplo, son ineludibles. Ultimamente se han conseguido importantes avances en el dominio de los efectos perturbadores.

La razón de que los campos magnéticos traben el paso de la corriente reside en su modo de penetrar. Entran en el superconductor en forma de haces discretos de flujo (vórtices), que, al moverse, dispersan energía y dificultan el flujo. Para que la corriente no se disipe, hay que amarrar las líneas de flujo. Una manera de hacerlo consiste en crear trampas, por lo usual bombardeando las muestras con iones pesados. Si éstos —átomos despojados de sus electrones— tienen suficiente masa, dejan rastros en columna que delimitan las líneas de flujo.

Por desgracia, esos iones no avanzan más allá de 20 o 50 micrometros en el material. Les es difícil atravesar el recubrimiento de plata que envuelve las bandas de cable superconductor comerciales. "A los iones pesados no les queda resuello cuando llegan al superconductor", dice Lia Krusin-Elbaum, del Centro de Investigación de la IBM Thomas J. Watson.

Para remediar el problema, Krusin-Elbaum y sus colaboradores, de seis instituciones diferentes, aceleran entidades mucho más livianas: protones. Cuesta menos impartirles gran energía y penetran más en las muestras. Son demasiado ligeros para crear defectos que sujeten. Sin embargo, se había adelantado que sí harían que los átomos del material sufriesen procesos de fisión. El proceso liberaría como subproductos iones pesados que crearían zonas de fijación.

El experimento ha ratificado la predicción. Con instrumentos del Laboratorio Nacional de Los Alamos, aceleraron protones a 800 millones de electronvolts y los dirigieron contra una banda de bismuto superconductora. A tales energías, los protones recorrían más de medio metro de material. Las micrografías electrónicas indicaban que los protones hacían que parte del bismuto se fisionase en iones pesados de xenón y kriptón, que se precipitaban fuera del superconductor, dejándole defectos en columna; como consecuencia de ello, el material transportaba, a una temperatura de 30 grados kelvin, hasta mil veces más corriente que antes.

Los defectos que genera la fisión reciben el nombre de defectos de columna abocinados, y son un medio muy eficaz de retener el flujo. Hacen que los vórtices magnéticos se entrelacen. "Como el ensanchamiento lo cruza y enreda todo, las líneas de flujo sujetas con más fuerza sostienen a las menos amarradas", explica David R. Nelson, uno de los artífices de la idea de los defectos abocinados. El experimento de la irradiación de protones señala que las sustancias plagadas de defectos de ese tipo fijan las líneas de flujo tres veces mejor que las columnas paralelas.

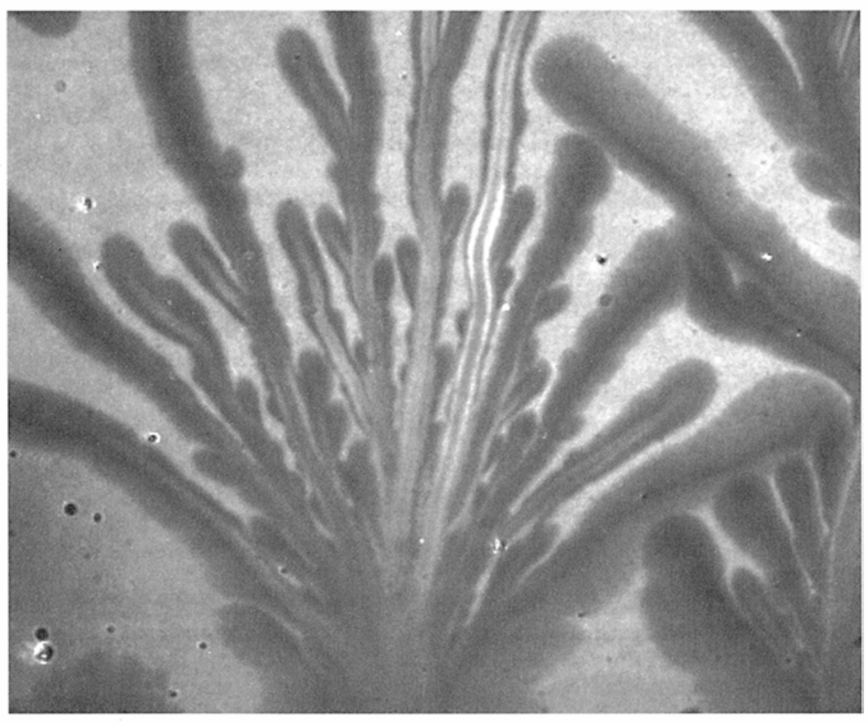
Es posible que el anclaje con protones no requiera el uso de grandes aceleradores. Cabe pensar que también protones mucho menos energéticos —y por tanto dispositivos mucho menos aparatosos— podrían causar fisiones. "Con treinta millones de electronvolts debería ser más que suficiente para que los protones atravesasen la barrera de carga del núcleo", observa Nelson.

Los trabajos de Carlos A. Durán, Peter L. Gammel y David J. Bishop, de AT&T, sugieren que quizá tengan otra herramienta, aparte de la fisión, quienes se dedican a fijar flujos. El grupo de Bishop, por medio de luz polarizada y un tipo especial de recubrimiento magnético tendido encima del superconductor, ha obtenido nuevas imágenes ópticas de la irrupción en éste de un campo magnético.

Las imágenes han sorprendido. El débil campo no entra por un frente único, sino que se ramifica como un río de montaña dividido en arroyuelos. Los puntos de ramificación parecen marcar áreas resistentes a la irrupción. "Las imágenes nos demuestran que no sabemos bien cómo penetra el flujo", dice Bishop. "Los patrones observados podrían enseñarnos nuevas maneras de sujetarlo." Serviría el construir los cables superconductores a capas, por ejemplo. Las capas detendrían la ramificación y limitarían la penetración del campo magnético en el superconductor.

Que se generalice el uso de materiales de alta temperatura dependerá tanto de su duración y facilidad de manejo como de la resistencia que presenten a la invasión por campos magnéticos. Pero, por lo que se refiere a fijar las líneas, la victoria parece estar más cerca que nunca.

PHILIP M. YAM



Dentritas de un campo magnético de 120 gauss que penetran lateralmente en una película de niobio superconductora. Las ramificaciones tienen en promedio unos 60 micrometros de largo

Algo para mascar

Defensas vegetales

Masticando la corteza de un sauce blanco, Edmund Stone, clérigo anglicano del siglo XVIII, descubrió las virtudes analgésicas del ácido salicílico, el ingrediente activo de la aspirina. Nadie ha indagado por qué Stone mordisqueaba la corteza del sauce. Un equipo de la Unidad de Investigación de Biotecnología Agrícola de Ciba-Geigy ha demostrado que la acumulación de ácido salicílico en el tejido vegetal, después de una infección, provoca la resistencia adquirida sistémica (RAS), una respuesta inmunitaria determinante.

Las dos principales defensas que una planta hereda en su lucha contra las enfermedades son la resistencia vertical y la resistencia horizontal. La primera actúa contra patógenos individuales. La segunda, categoría a la que pertenece la RAS, se organiza contra un amplio repertorio de patógenos emparentados; bloquea la acción y proliferación fúngica, bacteriana o vírica.

Se supone que la resistencia adquirida sistémica interviene en el control de la expresión de genes que determinan proteínas específicas. Algunas de estas proteínas actúan como antibióticos cuando se las ensaya *in vitro* ante patógenos vegetales. Puede que estas proteínas ayuden a mantener la salud de la planta cuando queda expuesta a la enfermedad. La aplicación externa de ácido salicílico a las hojas de la planta del tabaco induce el rápido desarrollo de RAS.

El trabajo de Ciba-Geigy publicado en un reciente número de *Science* confirma que la aparición de la RAS depende de los niveles de ácido salicílico. John Ryals debilitó la resistencia del tabaco a la infección cuando bloqueó la acumulación de ácido salicílico en la planta; para explicarlo con mayor exactitud, él y su grupo impidieron la acumulación de ácido salicílico en las plantas del tabaco insertando un gen que codificaba la producción de una hidroxilasa del salicilato.

A continuación, inocularon, en tres hojas de plantas alteradas y de plantas no alteradas de un grupo control, el virus del mosaico del tabaco (VMT), que induce la aparición de manchas verde oscuras y áreas amarillo páli-

das. Siete días después de la aparición de las lesiones, recogieron las hojas y las compararon. Las del grupo control mostraron una lesión más circunscrita. Además, estas plantas habían acumulado una cantidad de ácido salicílico 185 veces superior después de la infección, lo que era previsible. Las muestras en las que se había implantado el gen de la hidroxilasa del salicilato mostraron incrementos mínimos de ácido salicílico.

Los trabajadores expusieron después las hojas superiores de las plantas infectadas por el VMT a una segunda dosis del virus. Cinco días después, las hojas cuyo contenido en ácido salicílico era bajo tenían las lesiones mayores. Este resultado confirma el papel precursor que desempeñan las sustancias químicas en dicha forma de inmunidad vegetal. De lo que se infiere la necesidad de la presencia del ácido salicílico para que se desarrolle la RAS.

KRISTIN LEUTWYLER

Fermat resiste

La prueba que no llega

"Los problemas que vale la pena atacar demuestran su mérito devolviendo el golpe", sentenció Piet Hein, físico y poeta. Así lo confirma el caso del teorema magno o último teorema de Fermat, el cual, aparentemente fuera de combate el verano pasado, se ha rehecho y levantado de la lona, presto para un nuevo asalto.

El teorema, de simplicidad engañosa, enuncia que la ecuación $X^N + Y^N = Z^N$ no posee soluciones enteras positivas si el exponente N es mayor que 2. El problema fue propuesto hace unos 350 años por Pierre de Fermat (quien afirmó en el margen de un libro haber encontrado una demostración, pero que no podía darla allí por falta de espacio) se ha convertido en el más famoso de las matemáticas.

En junio del año pasado, Andrew J. Wiles, de la Universidad de Princeton, puso en ascuas a los especialistas al anunciar que había descubierto una demostración del teorema. Basándose sobre todo en la sólida reputación de Wiles y en su esbozo de un método anteriormente considerado prometedor, cierto número de luminarias matemáticas declararon que la demostración era casi con seguridad correcta. El hallazgo ganó la portada de muchos medios y de él se informó favorablemente en las páginas de esta revista.

Al poco de su anuncio, Wiles presentó un manuscrito de 200 páginas a *Inventiones Mathematicae*, y el editor de esta revista, Barry Mazur, de la Universidad de Harvard, se lo envió a seis recensores. Wiles subsanó inmediatamente diversos problemas de poca monta detectados por los recensores, pero uno de los problemas demostró ser menos tratable. En diciembre, Wiles manifestó que estaba trabajando en un "cálculo" que no estaba "aún completo". Wiles tranquilizó a su auditorio: "Creo que podré terminarlo en un futuro cercano".



Una curva compleja representa un conjunto de soluciones no enteras de la ecuación $X^N + Y^N = Z^N$

Karl Rubin, de Ohio, que en su calidad de recensor ha sido una de las pocas personas que han leído el manuscrito de Wiles, es optimista y apuesta por su éxito. Pero concede que sólo Wiles sabe exactamente en qué punto se encuentra la demostración, y éste, desde su declaración de diciembre, se ha mantenido incomunicado.

Algunos colegas están molestos por la reserva y su negativa a que el manuscrito sea accesible a más personas. Kenneth A. Ribet, de Berkeley, señala que es habitual que los matemáticos, una vez puesto su original en manos de una revista técnica, lo diseminen libremente para que pueda ser "desguazado en seminarios". Una demostración del propio Ribet, que contribuyó en 1986 a convencer a Wiles para que abordase el teorema de Fermat, fue refinada de este modo. Pero, tras hacer notar que Wiles estuvo trabajando en su demostración durante siete años en un aislamiento casi total, sugiere que Wiles "considera tener derecho a acabarla por sí solo".

En su declaración de diciembre, Wiles dijo que expondría la demostración de forma más completa en un seminario para graduados que debió comenzar en febrero. Los observadores se muestran escépticos sobre lo explícito que Wiles está dispuesto a ser, dada su querencia hacia la precaución y la reserva. Wiles ha dicho ya en dos ocasiones —una al final del verano y otra vez en noviembre— que revelaría detalles de su demostración. Ronald L. Graham, de los Laboratorios AT&T Bell, especula que, aun en el caso de que Wiles comience a exponer su demostración durante sus clases, podría tardar meses en llegar al punto que ahora le está creando dificultades.

James Propp, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, opina que el *affaire* Wiles suscita una interesante cuestión "sociológica": "¿En qué momento es un teorema tenido por verdadero?" Joseph J. Kohn, presidente del departamento de matemáticas de Princeton, abraza, en el caso de la demostración de Wiles, la fe de que es "verdadera hasta que se pruebe lo contrario". Wiles sigue mereciendo el beneficio de la duda, aduce Kohn, porque tiene un "expediente extraordinario."

Gerd Faltings, de Princeton, ha invertido el argumento de Kohn. La excepcional competencia de Wiles, señala Faltings, implica que el problema con que se ha tropezado es de una dificultad extrema, tal vez imposible de superar. "Si fuera sencillo, a estas alturas [Wiles] ya lo habría resuelto", opina Faltings, cuyo trabajo ayudó a Wiles a construir su demostración. "Estrictamente hablando", comenta, las congojas que está padeciendo recientemente hacen pensar "que no era una demostración cuando fue anunciada".

Alan Baker, de la Universidad de Cambridge, está de acuerdo. Fue uno de los pocos matemáticos eminentes que desde el principio expresó públicamente su escepticismo hacia la demostración de Wiles. Según cierta fuente, Baker llegó incluso a apostar 100 botellas de vino contra una sola a que en el plazo de un año quedaría probado que la demostración no era válida.

Baker desmiente tal envite, pero sí admite haber expresado "un saludable escepticismo" hacia la demostración. Después de todo, el teorema de Fermat es notablemente difícil y la demostración de Wiles se fundaba en trabajos que no tenían ni diez años de antigüedad y tal vez no habían sido concienzudamente verificados. Al igual que Faltings, Baker recalca su esperanza en que Wiles remate su demostración, pero, añade, "Me parece que ahora las expectativas son menores".

JOHN HORGAN

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

El color de la freza

En las aguas someras de los mares calientes y templados del Pacífico y el Atlántico vive una familia variopinta de peces, algunos de cuyos miembros, al menos, se distinguen por ejercer un comportamiento que solemos atribuir a los mamíferos y ciertas aves: la atención paterna. Son los tripterígidos, amantes de los arrecifes y sustratos roqueños. Pero se adaptan con facilidad a otros medios, como los algares mediterráneos de rodofíceas, las paredes verticales y las cuevas.

Estos peces litorales, de 5 a 10 centímetros de longitud y armados con escamillas, poseen tres aletas dorsales; con espinas las dos primeras y radios blandos la tercera. Dos espinas caracterizan a la aleta caudal. Entre la línea lateral y la testa se advierte una red sutil de poros mucosos.

Con todo, lo más llamativo es el dimorfismo sexual, que alcanza su máxima plenitud y colorido en la época de freza. El macho de *Tripterigion bapturum* enciende el tibio amarillo de su cuerpo e intensifica el negro de la cabeza, mientras se dedica al cortejo de la hembra; ésta, apoyada en el suelo con el cayado de la aleta pectoral, tiembla inquieta mientras desova y promueve una leve corriente, que arrastra los huevos. El macho, pegado ahora, eyacula en la corriente para fecundarlos.

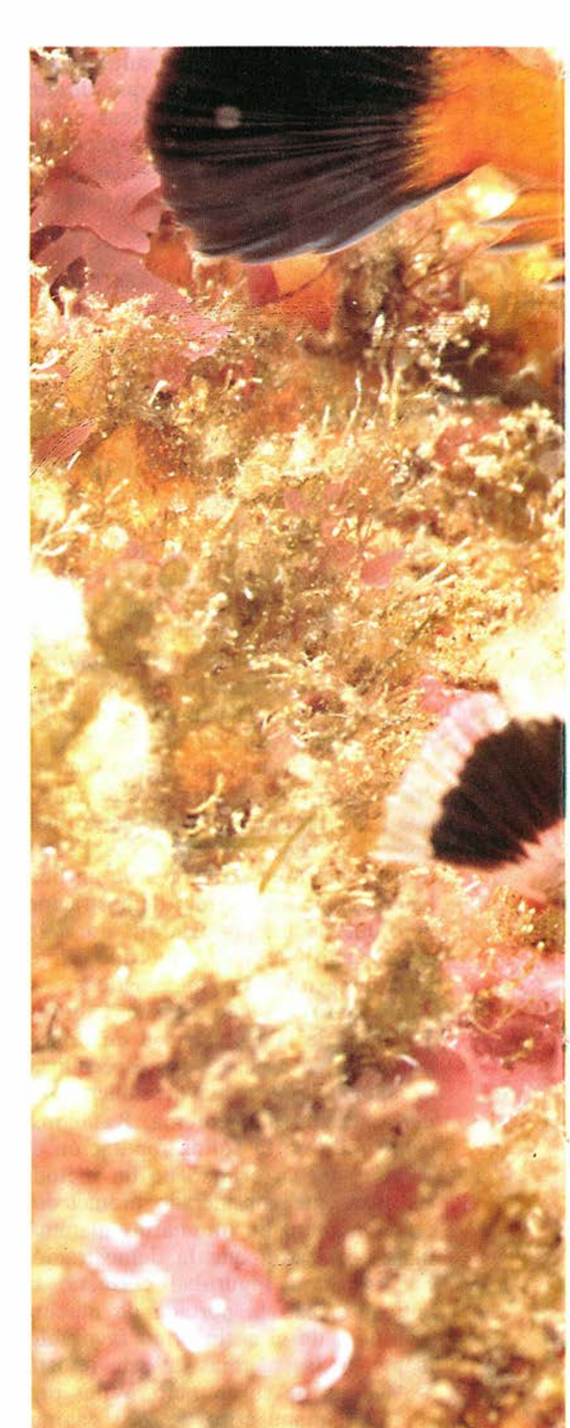


Foto superior, derecha
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1/60 de segundo
película: ISO = 25

Foto de la derecha
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1/60 de segundo
película: ISO = 25



¿Ver es creer?

La manipulación digital de imágenes ha desvirtuado la prueba fotográfica

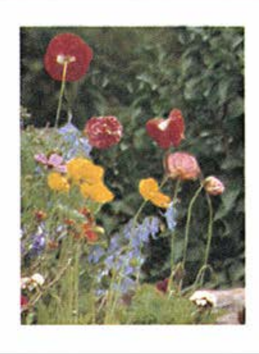
William J. Mitchell





El proceso de manipulación

Para crear la imagen "cada uno por su lado" (*arriba, centro*) a partir de la fotografía original (*arriba, izquierda*) el infografista empezó por siluetar y extraer las flores del fondo. "Clonó" la textura de la porción frondosa de la parte superior derecha del original y utilizó esa textura para cubrir "a brochazos" el porche situado tras las flores. Después difuminó el perfil de Bush y sus inmediaciones (proceso de "esfumado" o "vignetting") y lo deslizó por detrás de las flores siluetadas. Los arbustos fueron levemente difuminados. Se procedió entonces a siluetar la piedra alargada que oculta los pies de Thatcher y le aplicó una simetría respecto a un plano vertical. Hubo que duplicar y agrandar los helechos que





En septiembre de 1993, los periódicos amanecieron con una instantánea casi increíble, en la que Isaac Rabin, primer ministro de Israel, y Yasser Arafat, presidente de la Organización para la Liberación de Palestina, se estrechaban las manos en el césped de la Casa Blanca ante el presidente Bill Clinton. En 1988, la revista *Life* publicaba una foto igualmente asombrosa, la de Arafat saludando cálidamente al entonces primer ministro Isaac Shamir bajo la mirada aprobadora del presidente Ronald Reagan. Una de estas imágenes registraba una acontecimiento auténtico. La otra era una composición, una manipulación informática.

Podemos confeccionar "fotografías" trucadas, como las anteriores, mediante programas muy difundidos de "pintura" y procesamiento de imágenes, que permiten organizar, colorear y transformar los elementos que componen una escena. Esos mismos programas combinan fragmentos de imágenes diferentes y los integran en una nueva imagen. Otros programas generan imágenes sintéticas de calidad fotográfica, aplicando refinadas técnicas de proyección y sombreado en perspectiva a modelos digitales de escenas tridimensionales, que ya son de uso habitual en la presentación de proyectos arquitectónicos y en la creación de efectos especiales en cinematografía.

A diferencia de los dibujos y retratos, que tenemos por productos de la invención humana y de suyo poco fiables, estos trucajes pueden llevarnos a convicciones erróneas. Lo mismo que las huellas dactilares dejadas en la escena de un delito o que los rastros de carmín en el cuello de una camisa, parecen ser resultado de procesos causales involuntarios y, por ende, pruebas fiables y exactas de lo sucedido.

MANIPULACION DIGITAL de una fotografía para provocar dos impresiones dispares. ¿Qué hubo entre Margaret Thatcher y George Bush? ¿Un diálogo, una pelea o una confidencia íntima?







cubren el extremo de la manga en el original, para que ésta pudiera acabar en algún sitio. Y a la derecha de la pierna extendida de Bush hay un trozo de murete que ha sido duplicado del situado en el original justamente a la derecha de la manguera. El nuevo helecho suaviza la transición entre los dos trozos de muro, además de ocultar la manga de riego.

En la imagen "susurros íntimos" (*arriba, derecha*) el perfil de Bush, algo difuminado, fue desplazado hacia la izquierda cubriendo los arbustos que le separan de Thatcher.



Fotomontaje "por recorte y pegado"

Los métodos tradicionales, basados en "recortar y pegar", transformaron una fotografía de 1923 que mostraba tres campesinos soviéticos (*abajo*) en "pruebas" de la permanencia en prisión de tres aviadores americanos desaparecidos en Vietnam (*arriba*). En los fotomontajes tradicionales resulta relativamente fácil detectar que son trucajes. El mostrado tiene muchas imperfecciones.

¿Resultan convincentes los mostachos? ¿Puede el lector





detectar los retoques hechos a mano? ¿Hemos de leer el letrero como un rectángulo escorzado (cuyo borde derecho está más cerca de la cámara que el izquierdo) o como un cuadrilátero irregular? ¿Se encuentra por delante o por detrás de la figura de la izquierda? ¿Qué lo sostiene vertical? (Fijémonos en la mano de la parte superior izquierda en el original.) Las ambigüedades espaciales sugieren que el rectángulo fue introducido en la foto pegándolo.

Atendamos a la borrosidad y la deficiente calidad tonal. Este desenfoque puede ser deliberado, con el propósito de ocultar algunas de las imperfecciones. Hace pensar también en degradación generacional resultante del refotografiado en lugar de la positivación a partir de un negativo original.

El trucado de fotografías para manipular o inducir a error no nació ayer. Los métodos de exposición múltiple, previa al positivado, de recorte y pegado o de retocado, se aplicaron muchas veces para toda clase de amaños y para la propaganda política. En el siglo XIX se produjeron "fotografías del espíritu" por doble exposición; en la era estalinista los técnicos en propaganda eliminaron con el aerógrafo la imagen de Trotsky, políticamente inconveniente, de una célebre fotografía que mostraba a Lenin dirigiéndose a las masas el 5 de mayo de 1920. Pero las técnicas digitales de tratamiento de imágenes hacen mucho más sencilla la producción de falsedades fotográficas, mucho más difíciles de detectar. El problema de distinguir lo auténtico de lo artificioso se está tornando cada vez más urgente ante la explosiva proliferación de las técnicas de imaginería digital. Nos acercamos al punto en que la mayoría de las imágenes que veamos en nuestra vida diaria —las que forman nuestra comprensión del mundo— habrán sido registradas, transmitidas y procesadas por métodos digitales.

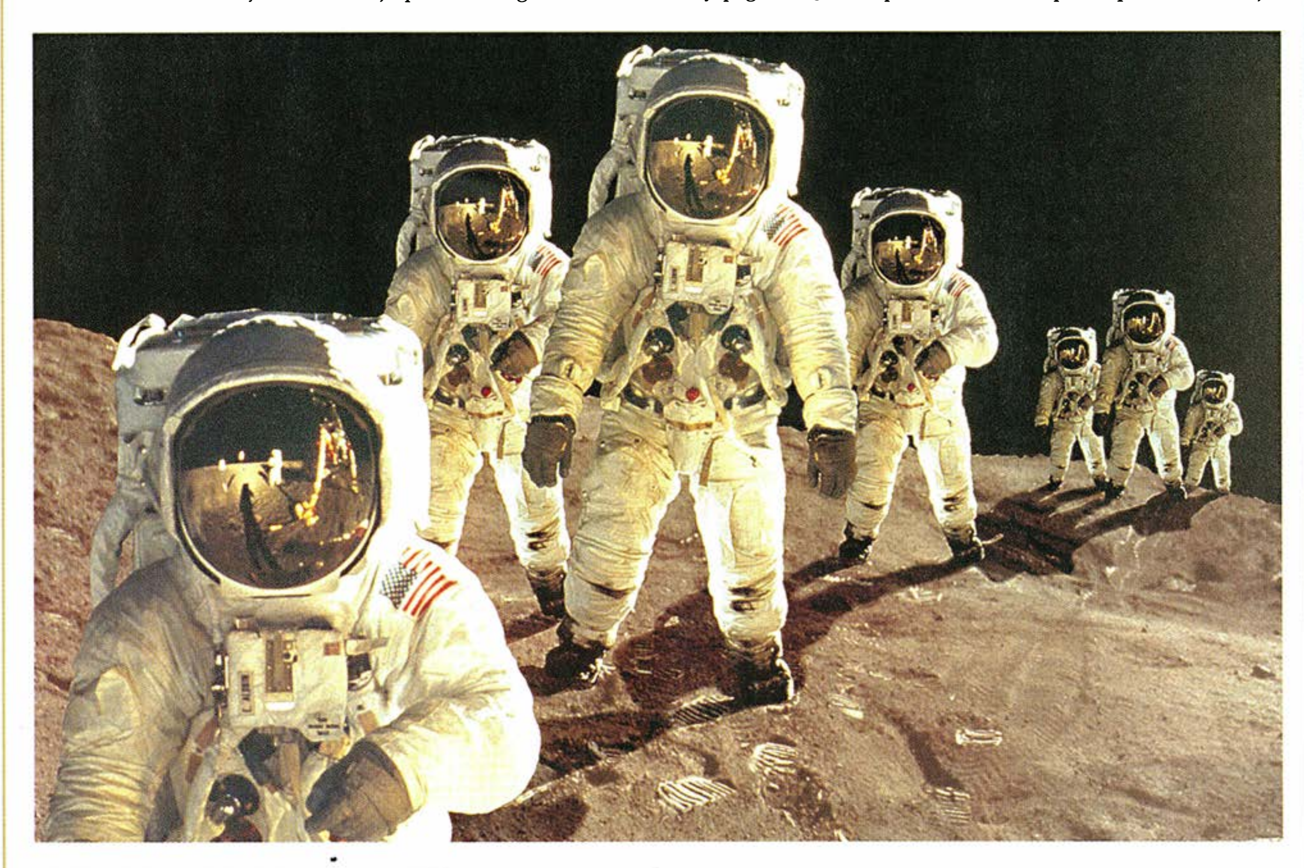
En los fotomontajes tradicionales, una inspección minuciosa suele revelar indicios físicos evidentes del trucaje efectuado. Si en el positivado se interponen máscaras o se dan cortes con bisturí pueden aparecer bordes vivos poco plausibles; los trazos con lápiz de retoque o las pinceladas de pintura tienden a resaltar entre la textura más granulada de los alrededores; los fundidos y las reconstrucciones de texturas superficiales quizá resulten imperfectos; puede que los colores no casen del todo. Pero las imágenes digitales se manipulan modificando los valores de los píxeles (elementos de imagen) almacenados en la memoria de un ordenador, en vez de por alteración mecánica de las superficies. Por consiguiente, es característico de los fotomontajes digitales que en ellos sean mucho menores los rastros de la acción del artista. Además, los programas para la producción de composiciones digitales suelen simplificar tanto el trabajo, que la tarea ya no requiere excepcional habilidad. Los programas proporcionan instrumentos eficaces para repasar y mezclar bordes, igualar tonos y matices, y para duplicar texturas. Por consiguiente, no basta que las imágenes presenten superficies sin costurones ni cicatrices para poder afirmar que no ha

sido manipulada. Es preciso buscar indicios de otro tipo, como la coherencia interna de la imagen, la demostrabilidad de su origen o su concordancia con otros datos.

Una imagen desprovista de contradicciones internas no es por ello demostradamente veraz. Pero la existencia de esos fallos sí sirve para negar que cierta imagen sea transcripción fotográfica de la realidad física. He aquí algunas de las preguntas obligadas en nuestra búsqueda de contradicciones: ¿Dan los objetos de la escena la impresión de hallarse en la perspectiva correcta? Escorzos y deformaciones de superficies que la perspectiva provoca, ¿son coherentes con la orientación espacial que sugiere su sombreado? ¿Muestran todos los indicadores de tiempo, como los relojes y las sombras, que la exposición corresponde a un solo momento? ¿Hay objetos que resalten por demasiado claros o demasiado oscuros con respecto a su entorno? ¿Se han insertado objetos en la imagen, objetos que resultan sospechosos por carecer de sombra o por proyectarla en distinto ángulo que los demás? ¿Existen sombras que no parezcan proyectadas por ningún cuerpo? ¿Son coherentes las sombras y los reflejos con la ubicación supuesta de las fuentes de luz? ¿Existen en el fondo de la imagen discontinuidades inesperadas que sugieran la eliminación de objetos situados en primer plano? ¿Reflejan las superficies brillantes

Fotomontaje digital

Este fotomontaje digital de siete astronautas en la superficie de la Luna se confeccionó a partir de una fotografía de un astronauta, Edwin F. Aldrin, Jr., tomada por la NASA en 1969 (*abajo*). El montaje posee una gran calidad técnica; está cuidadosamente amañado para hacerlo espacialmente verosímil; una tecnología digital muy refinada ha permitido eliminar todos los signos que pudieran mostrar recortes y pegados. ¿Cómo podemos afirmar, pues, que es un trucaje?





Existe una contradicción interna obvia. Dado que la composición ha sido efectuada a partir de copias a menor escala de la figura original, las imágenes reflejadas en los visores son incorrectas. Cada una muestra la imagen de otro astronauta, y no los varios que serían de esperar.

Se observa también una repetición poco plausible, fundamento sólido para sospechar que la imagen se obtuvo por operaciones de replicación. ¿Es verosímil que todos los astronautas salvo uno mantengan el brazo izquierdo en la misma posición?

Hay sombras sospechosas. El artista tuvo que insertarlas con un "pincel" digital y afrontar la difícil tarea de hacerlas concordar con un suelo irregular. ¿Soportarían las sombras de los de atrás una inspección minuciosa y crítica?

Tales fallos e incoherencias resultan muy obvias una vez que han sido señaladas, pero lo más corriente es que pasen inadvertidas a primera vista. Un falsificador diestro trata de prever los tipos de verificaciones que puede llevar a cabo un observador desconfiado y ajustará en consecuencia la indicación visual.

Confección de la imagen de la portada

Como imágenes de base, el infografista seleccionó un fotograma de Marilyn Monroe tomado en 1955 para promocionar *La tentación vive arriba* y un retrato oficial de Abraham Lincoln, tomado en 1863 (*1*). Con el fin de generar una imagen final más rica, el artista transfirió estas imágenes mediante un escáner, tratándolas como si estuvieran en color, a pesar de estar en blanco y negro. Una vez digitalizadas las imágenes, transformó a Marilyn Monroe en su simétrica vertical y extrajo su silueta del fondo (*2*). En la imagen de Lincoln prolongó el lado

1







2

3



izquierdo del suelo (*3*); la pieza que vemos flotar en el aire fue copiada y duplicada varias veces para disponer del pavimento adicional necesario. Seguidamente rellenó la pared sin pararse demasiado en los detalles (*4*), preparándola para recibir la figura siluetada de Marilyn, que fue colocada sobre la imagen de Lincoln (*5*). Enmascaró después ambas figuras, aislándolas de la zona que las rodea, para poder igualar el fondo sin afectarlas (*6*).

4



5



6



Tomas de cerca (*7*) muestran a Marilyn antes y después de que se añadiera "ruido" con el fin de degradar su imagen e igualarla a la fotografía de Lincoln, más antigua. (La función de ruido, que está incorporada al programa, añade píxeles al azar.) Para que Marilyn tuviera una mano y un brazo que pasar bajo el codo de Lincoln,





7

8



9



el artista preparó un vídeo de su esposa cogida del brazo de su ayudante (*8*), cuidando que la iluminación simulase la de las fotografías originales. Tomó después uno de los cuadros del vídeo y lo captó con su ordenador. El vídeo fue convertido de color a tonos grises e incorporado a la imagen de Abraham Lincoln y Marilyn Monroe (*9*).




¿CUAL DE ESTAS VERSIONES corresponde a una descripción auténtica? Casi nadie tiene manera de juzgar cuál de las dos imágenes, producidas para vídeo de baja resolución, corresponde al retrato del edificio auténtico. No hay indicios internos que puedan revelar la falsificación. Los especialistas en historia de la arquitectura del Renacimiento italiano reconocerán que la versión con la torre (*derecha*) corresponde al proyecto de Andrea Palladio para la Villa Godi, que fue publicado pero no construido, mientras que la versión sin torre (*izquierda*) muestra el diseño edificado. La imagen del proyecto no construido fue preparada por desplazamiento de las ventanas y las chimeneas, ensanchado de la estrecha escalinata y replicación de fragmentos de las superficies de las paredes y del tejado para delinear la torre.

las porciones de la escena que sería de esperar? ¿Están las intensidades superficiales debidamente modificadas por los efectos de interreflexión difusa? ¿Hay gradientes de textura plausibles con las superficies que se adentran hacia el fondo de la imagen? ¿Aportan la perspectiva geométrica (disminución del tamaño con la profundidad de la escena) y la perspectiva atmosférica (modificación del color con la profundidad) informaciones concordantes sobre las profundidades? ¿Hay coherencia en el gradiente de nitidez de enfoque a partir de un mismo plano focal?

Cuanto mayor sea la información contenida en una imagen, tanto más difícil resulta modificarla sin introducir artificios detectables. Cuesta mucho menos alterar una imagen en blanco y negro mal enfocada y escasamente iluminada que hacer lo propio con una imagen nítida, de alta resolución y a todo color. El manipulador fotográfico, lo mismo que el lenguaraz que teje una intrincada trama de mentiras y acaba por quedar embrollado en ellas, corre el riesgo de verse atrapado por alguna sutil contradicción, que sólo se manifiesta cuando todas las claves visuales son cuidadosamente confrontadas unas con otras.

Las imágenes sintéticas, producidas mediante programas de visualización en tres dimensiones, pueden, no obstante, hallarse completamente libres de tales fallos. Escenas tridimensionales modelizadas, presentadas en perspectiva y con sombras y reflejos determinados mediante rastreo de rayos ("ray tracing") o radiosidad (técnicas que calculan la interreflexión de la luz en el interior de una escena), son capaces de simular todos los efectos complejos de luces y sombras que incluso el observador más exigente esperase ver. Ciertas "fotografías" pueden superar fácilmente todas las verificaciones de consistencia interna.

Es preciso atender a otros criterios, como la procedencia de la imagen. Dado que toda fotografía se toma en un lugar y momento determinados, siempre podemos pedir que nos expliquen a qué se debía la presencia del fotógrafo allí y entonces. Podemos pedir que nos expliquen cómo llegó después la imagen desde el punto donde fue tomada hasta su localización presente. La credibilidad general de la fuente —trátese, por ejemplo, de una presunta fotografía de la superficie de Marte publicada en *Nature* o en un semanario sensacionalista— puede hacer las veces de una narración explícita.

No es difícil rastrear la procedencia de una fotografía tradicional: las películas expuestas, los negativos y las fotos reveladas han de ser físicamente transportadas de un lugar a otro; asimismo, revelado y positivado han de realizarse en laboratorios equipados. Las técnicas de imaginería digital hacen mucho más difícil este rastreo: no existen negativos; la duplicación de archivos puede efectuarse en pocos segundos y las imágenes digitales ser transmitidas rápida e invisiblemente por redes informáticas o telefónicas.

Los problemas más sutiles están planteados por imágenes que no muestran señales detectables de manipulación ni discrepancias internas obvias, pero que contradicen nuestras convicciones más firmes. Supongamos, por ejemplo, que no creamos que Elvis Presley esté vivo, y sin embargo, una fuente que parece ser fiable nos presenta una "fotografía" suya, nítida, detallada, en un ambiente moderno y reconocible. Tenemos la opción de seguir confiando en la autenticidad de las pruebas del fallecimiento de Elvis y rechazar la imagen, considerándola un montaje, o aceptar las nuevas pruebas que se nos presentan y modificar adecuadamente nuestras convicciones. Tales juicios resultarán cada vez más cruciales.

A lo largo de siglo y medio, la prueba fotográfica ha gozado de un valor demostrativo indiscutible. La estandarización temporal de la fotografía química y la estabilización del proceso de producción de imágenes han servido eficazmente a los propósitos de una era dominada por la ciencia, la exploración y la industrialización. Se consideró informe veraz y causalmente generado de los objetos y seres del mundo real. La aparición de las técnicas de tratamiento digital de imágenes ha desvirtuado sin remedio aquellas seguridades, obligándonos a adoptar una actitud mucho más cautelosa y vigilante, y a analizar las interpretaciones. Las supervías de información van a aportarnos una creciente riada de información visual en formato digital. Habremos de poner el mayor cuidado para tamizar los hechos.

WILLIAM J. MITCHELL, autor de *The Reconfigured Eye: Visual Truth in the Post-Photographic Era*, desarrolla labores docentes en la Escuela de Arquitectura y Planificación del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Aerosol de sulfatos y cambio climático

Las emisiones industriales de azufre forman partículas que reflejan la radiación solar de vuelta al espacio, lo que amortigua el efecto de invernadero sobre algunas partes de la Tierra

Robert J. Charlson y Tom M. Wigley

El efecto de invernadero es una realidad geofísica. Ciertos gases atmosféricos, como el dióxido de carbono y el metano, aprisionan y conservan el calor, gracias a lo cual sobreviven los organismos de la Tierra. Esos gases calientan la superficie terrestre unos 33 grados, elevando su temperatura por encima del punto de congelación hasta su promedio actual, que viene a ser de 17 grados.

Los modelos y análisis del calentamiento global coinciden, por lo general, en que la mayoría de los gases de larga vida que la actividad humana agrega a la atmósfera hacen que la Tierra sea más caliente de lo que sería sin ellos. No obstante, subsisten discrepancias entre la teoría y la observación. El calentamiento que se predice teniendo en cuenta el incremento de la concentración de gases de invernadero en los últimos tiempos es ligeramente mayor que el observado en la atmósfera. Además, la tendencia al calentamiento no parece seguir en ciertas regiones el patrón global. ¿Cuál podría ser la explicación de estas y otras discrepancias entre los hechos y la teoría?

La respuesta tiene su ironía. Con toda probabilidad, los aerosoles cuyo principal componente son sulfatos, resultado de la actividad industrial, refuerzan la capacidad de la atmósfera para reflejar la radiación solar y devolverla al espacio antes de que alcance la superficie del planeta y participe en el proceso de calentamiento. Las partículas de sulfatos, de 0,1 a un micrometro de diámetro, se concentran sobre las regiones industriales del hemisferio norte.

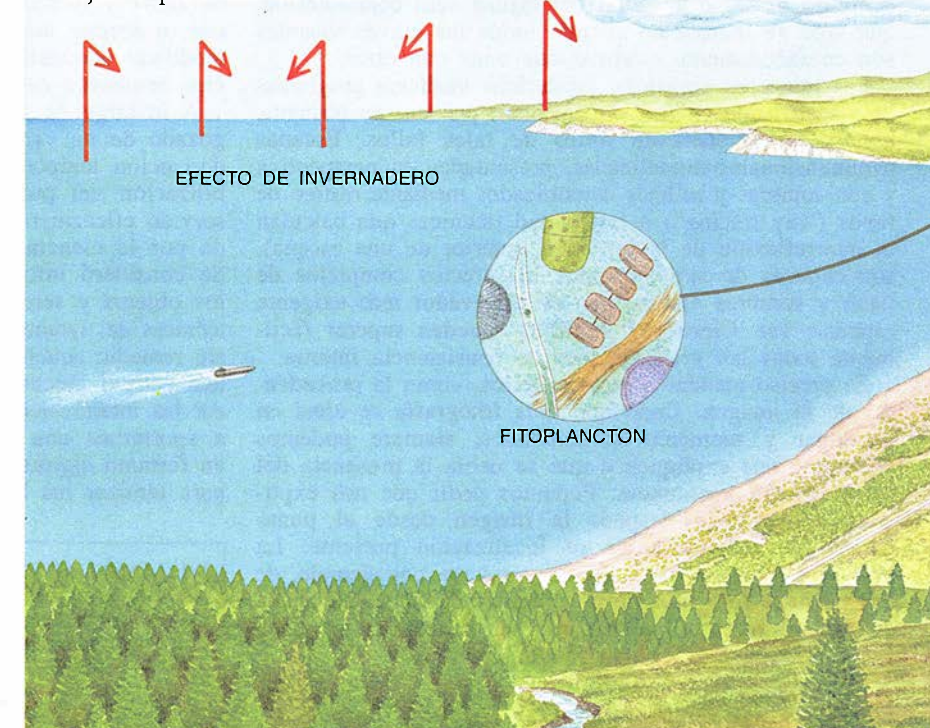
Se sabe, desde hace muchos años, que contribuyen a la lluvia ácida, y, desde hace muy poco, que, por culpa del enfriamiento que producen al dispersar la luz solar, constituyen un factor de peso en el cambio climático. Si se desean modelos climáticos precisos y políticas industriales eficaces, hay que tener en cuenta tanto el enfriamiento producido por aerosoles como el calentamiento debido a los gases de invernadero.

Hay varias clases de aerosoles naturales, pero no parece que sean factores de cambio importantes. Es probable que los aerosoles naturales —en su mayoría polvo continental, sal marina y compuestos de sulfatos marinos— ha-

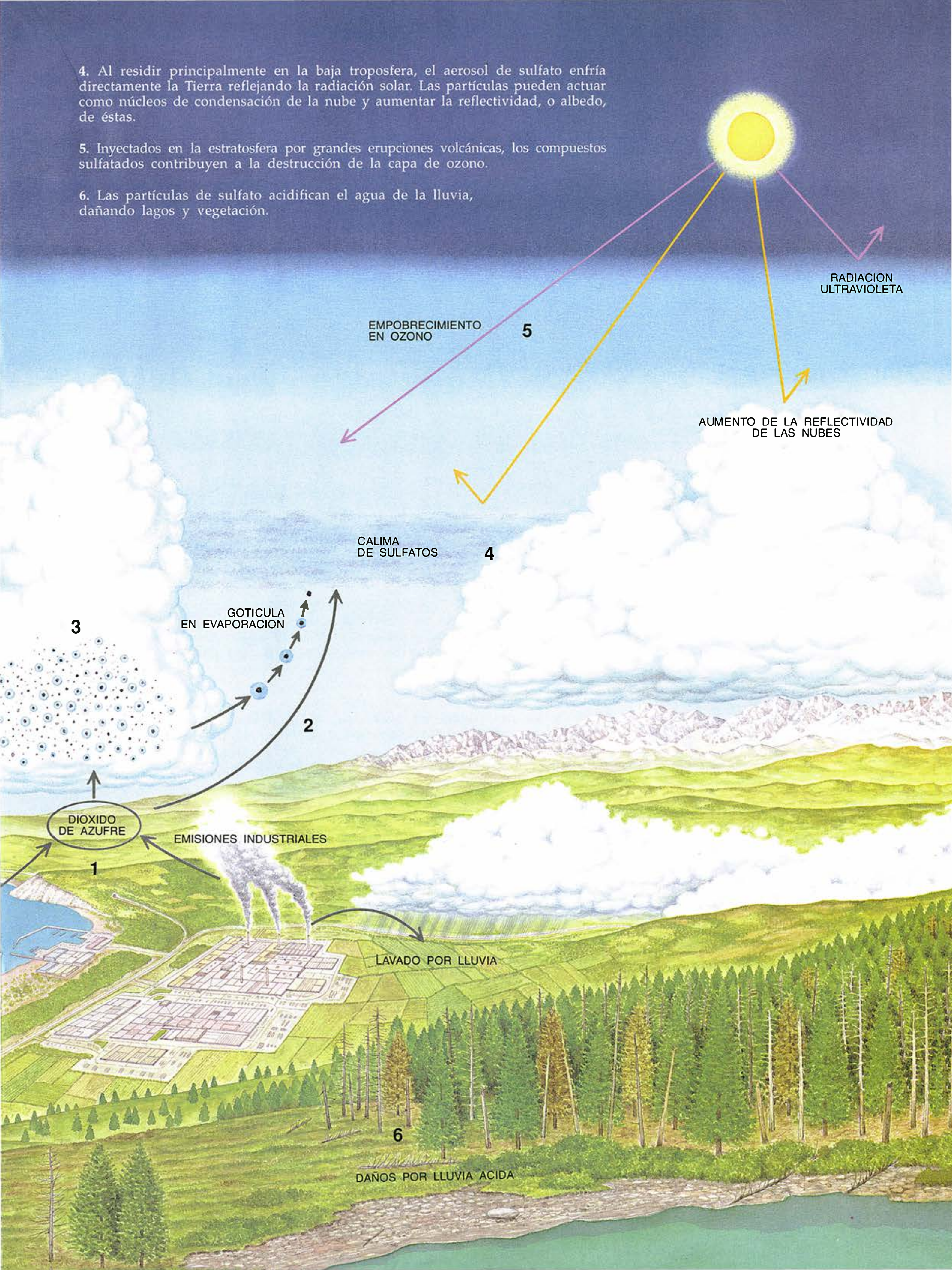
1. La industria constituye la fuente principal de dióxido de azufre. El fitoplancton marino aporta azufre en forma de sulfuro de dimetilo, que reacciona con sustancias químicas en el aire para dar dióxido de azufre. La precipitación y la circulación atmosférica eliminan aproximadamente la mitad del dióxido de azufre.

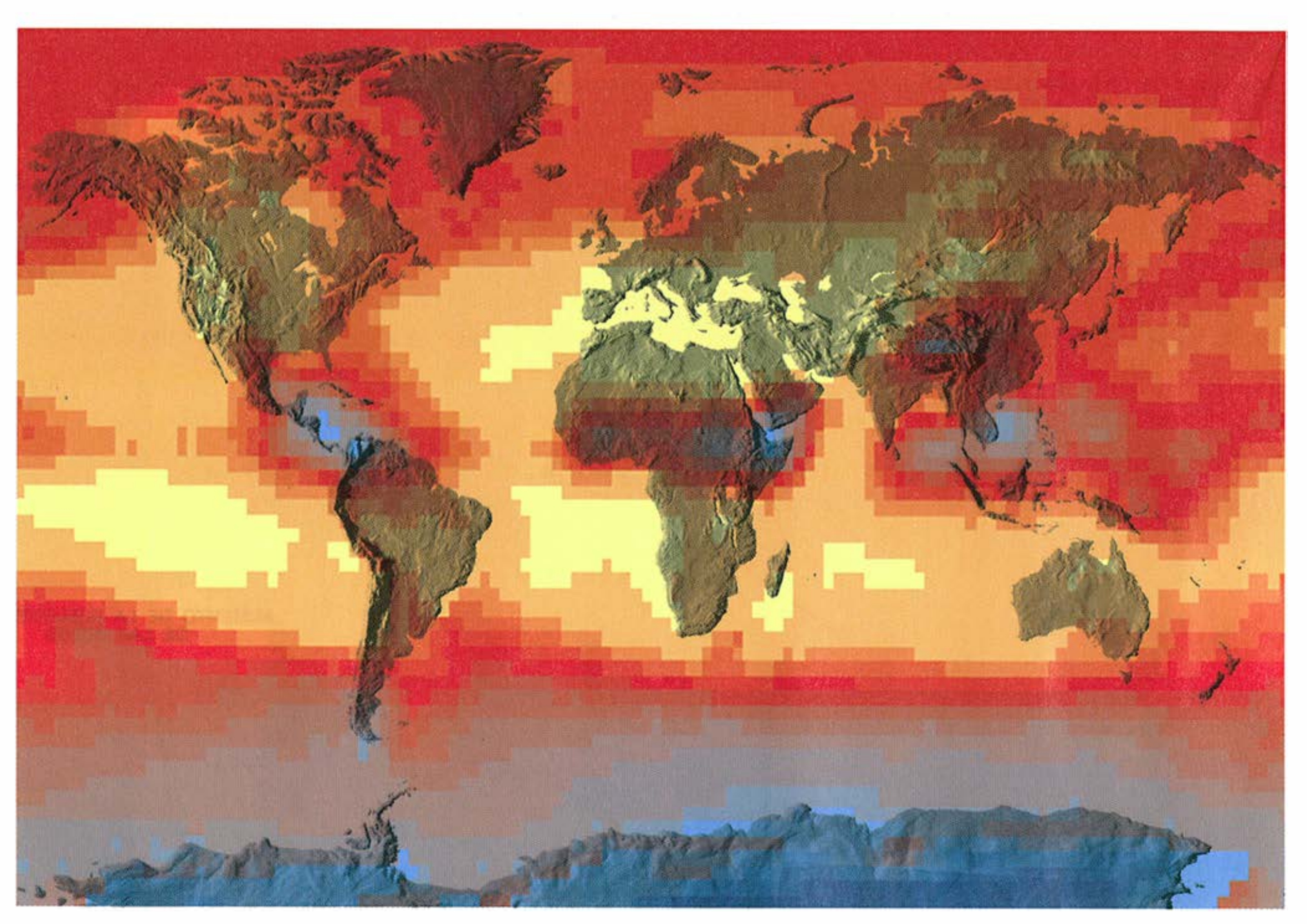
2. En los procesos con cielo despejado, el dióxido de azufre forma directamente aerosol de sulfato a través de reacciones químicas con compuestos existentes en la atmósfera.

3. En los procesos en nube, el dióxido de azufre es oxidado por el peróxido de hidrógeno en las gotículas de aquélla. Se forma ácido sulfúrico. Las gotículas se evaporan dejando partículas de sulfato.



1. EL AZUFRE DE LA INDUSTRIA y del fitoplancton ejerce diversos efectos en el entorno. Enfría la Tierra al formar partículas que difunden la luz solar devolviéndola al espacio, con lo que compensa en parte el efecto de invernadero.


4. Al residir principalmente en la baja troposfera, el aerosol de sulfato enfría directamente la Tierra reflejando la radiación solar. Las partículas pueden actuar como núcleos de condensación de la nube y aumentar la reflectividad, o albedo, de éstas.
5. Inyectados en la estratosfera por grandes erupciones volcánicas, los compuestos sulfatados contribuyen a la destrucción de la capa de ozono.
6. Las partículas de sulfato acidifican el agua de la lluvia, dañando lagos y vegetación.
RADIACION ULTRAVIOLETA
EMPOBRECIMIENTO EN OZONO
5
AUMENTO DE LA REFLECTIVIDAD DE LAS NUBES
CALIMA DE SULFATOS
4
GOTICULA EN EVAPORACION
3
2
DIOXIDO DE AZUFRE
EMISIONES INDUSTRIALES
1
LAVADO POR LLUVIA
6
DAÑOS POR LLUVIA ACIDA



2. MODIFICACION DEL CLIMA por la actividad humana, puesta de manifiesto en los cálculos de ganancia global de calor durante el verano en el hemisferio norte. En julio, los gases de invernadero calientan la Tierra en unos 2,2 watts por metro cuadrado (*izquierda*). Cuando se incluye el enfriamiento por aerosol de sulfatos el aporte modificador se reduce a 1,7 watts por metro cuadrado (*derecha*). El enfriamiento domina sobre las regiones industriales del hemisferio norte.

yan mantenido su concentración, distribución y propiedades más o menos constantes durante al menos un siglo; por consiguiente, no deben de haber contribuido a ninguna alteración observable en el clima. Y es probable que los aerosoles volcánicos tampoco hayan añadido nada a los efectos a largo plazo. La tendencia al enfriamiento propiciada por las erupciones del Tambora en 1815, Krakatoa en 1883 y Pinatubo en 1991 duró sólo unos años.

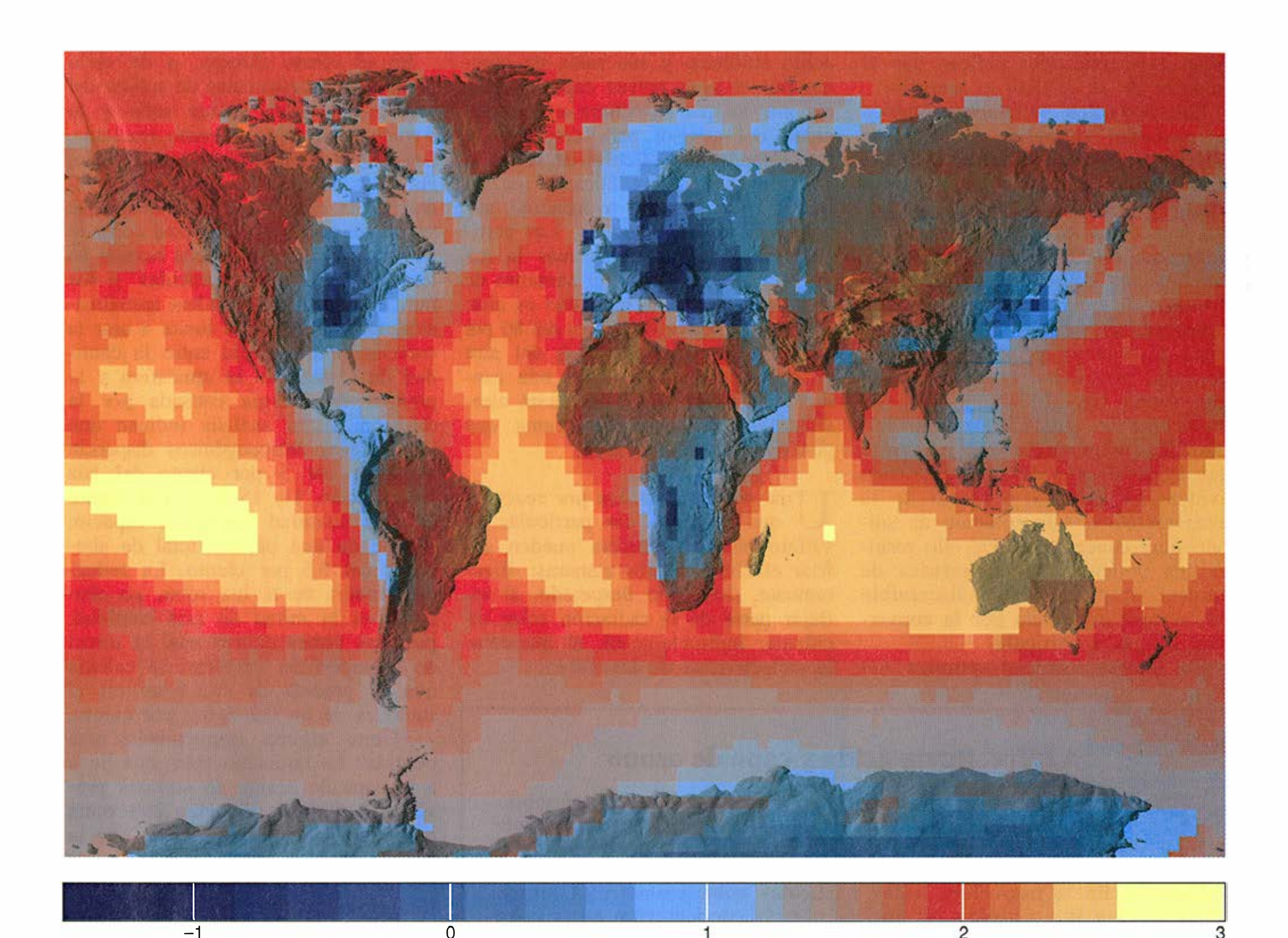
Sí han aumentado en la atmósfera, y mucho, aerosoles antropogénicos; al principio durante la etapa de industrialización y, de manera mas rápida, desde los años cincuenta. De todos los contaminantes en forma de partículas que crean los humanos, los climatólogos han fijado su atención en los compuestos sulfatados; por una razón sencilla: gracias a la enorme cantidad de datos recogidos en el estudio de lluvia ácida, los sulfatos son los aerosoles que mejor se conocen. Puede que otros aerosoles produzcan un impacto cercano en magnitud al causado por el azufre industrial. Pero la escasez de datos torna más inseguros los cálculos.

No es fácil en el clima, un sistema complejo, determinar la cuantía del enfriamiento causado por aerosoles de sulfatos. Muchas variables complican el trabajo: cantidad de azufre en la atmósfera, su distribución sobre el globo, mecanismo de formación de los aerosoles, grado de reflectividad de las partículas y efecto de éstas en las nubes. La fiabilidad de una predicción exige que se adopten supuestos correctos, requisito que no cumplían algunos de los primeros estudios sobre el efecto de los aerosoles en el clima. Creíase, sin fundamento alguno, que la mayor parte de la bruma fuera de las ciudades era un "aerosol natural de fondo".

Admitíase también que la mayor parte de las partículas de aerosol se creaban por procesos desarrollados en la superficie; supuesto éste que es válido solamente para dos clases de aerosoles: los introducidos en la atmósfera por el viento (sal marina y polvo de tierra) y los que proceden directamente de combustiones (humo industrial y partículas de incendios forestales o de pastos). Los estudios realizados durante los últimos diez años indican que la mayor parte de los aerosoles sulfatados se originan por reacciones químicas de gases liberados a la atmósfera y contienen azufre, y que estas reacciones tienen lugar en la troposfera, es decir, en la parte de la atmósfera que va de la superficie de la Tierra hasta una altura de unos 10 kilómetros.

Para calcular el aumento de azufre en la troposfera, los climatólogos se basan en la tasa de las emisiones

ROBERT J. CHARLSON y TOM M. WIGLEY han aunado sus conocimientos de química de la atmósfera, el primero, e interpretación de archivos de temperatura, el segundo, para estudiar el efecto producido en la Tierra por el aerosol de sulfatos. Charlson es catedrático de la Universidad de Washington. Wigley dirige la Oficina de Estudios Interdisciplinarios sobre la Tierra en la Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica de Colorado en Boulder.



GANANCIA MEDIA DE CALOR, JULIO DE 1993 (WATTS POR METRO CUADRADO)

industriales. Los gases compuestos de azufre y los sulfatos que de ellos se forman duran en la troposfera sólo unos días, de modo que la concentración media en la atmósfera es directamente proporcional al producto de la tasa de emisión por la vida media de esas sustancias. Por tanto, los efectos primarios deben reflejar la distribución geográfica de las fuentes de azufre.

Más de dos tercios de la provisión atmosférica de gases compuestos de azufre, en su mayoría emitidos en forma de dióxido de azufre (SO_2), es antropogénica. Alrededor del 90 por ciento de esa cantidad se produce en el hemisferio norte, donde la actividad humana quintuplica la emisión natural de gases azufrados. En el hemisferio sur, las emisiones antropogénicas son alrededor de un tercio de las naturales. El principal portador natural de azufre reactivo es el sulfuro de dimetilo ($(CH_3)_2S$), o SDM, originado por el fitoplancton marino. En ausencia de fuentes antropogénicas, el SDM es la fuente dominante de partículas submicrométricas. Una pequeña cantidad (en forma de sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre o ambos) proviene de volcanes o de marismas y zonas pantanosas.

El dióxido de azufre suele permanecer en su hemisferio de origen. La mezcla térmica y química de las dos mitades de la atmósfera terrestre requiere alrededor de un año, tiempo muy superior a la vida media del dióxido de azufre o del aerosol sulfatado que éste produce. Aunque los hemisferios son regiones desacopladas por lo que se refiere a la distribución de los aerosoles, los del hemisferio norte podrían afectar el clima mundial, a la manera de la cubierta de nubes regional, que controla el albedo medio, o reflectividad, de la Tierra.

La atmósfera pierde directamente en torno a la mitad de la cantidad total de gases azufrados, con la lluvia o a través de reacciones con las plantas, el suelo o el agua del mar. El resto sigue en ella, para oxidarse con compuestos en la troposfera y producir así partículas de aerosol. Casi todos los gases que contienen azufre son químicamente reactivos en presencia de agentes oxidantes, y de éstos el principal es el radical hidroxilo (OH).

Las reacciones que crean aerosoles sulfatados pueden dividirse, a grandes rasgos, en procesos con cielo despejado y procesos en nube. En los primeros, el dióxido de azufre y el SDM reaccionan, en presencia de vapor de agua y a través de una serie de pasos, hasta producir ácido sulfúrico gaseoso (H_2SO_4). El compuesto forma partículas cuyo tamaño es de una fracción de micrometro. Lo hace condensándose sobre partículas ya existentes o interaccionando con moléculas de vapor de agua o con otras moléculas de ácido sulfúrico. Esta transformación se llama conversión de gas a partícula. El ácido sulfúrico reacciona después con minúsculas cantidades de amoníaco, con lo que se producen formas hidratadas de sales de sulfato amónico ($(NH_4)_2SO_4$). Además, el SDM puede reaccionar para formar otra especie condensable, el ácido metanosulfónico (CH_3SO_3H), o AMS. Aunque éste es un importante componente atmosférico y compuesto traza, las úl-

timas investigaciones indican que el impacto de su aerosol es pequeño.

Los aerosoles sulfatados también se producen en nubes. Esta vía se inicia cuando el dióxido de azufre se disuelve en gotículas de nube ya existentes. Allí lo oxidan las pequeñas concentraciones de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que se crean por combinación de dos moléculas de hidroxilo; la reacción de oxidación forma entonces ácido sulfúrico y sus sales de amonio en solución. En la gotícula, el sulfato ácido existe en una forma muy hidratada, con las moléculas de agua enlazadas al sulfato. La evaporación elimina parte del agua. Como los sulfatos tienen avidez por ésta, el producto de la evaporación es una solución de sulfato muy concentrada. De ello resulta una gotícula submicrométrica de aerosol químicamente indiscernible del aerosol producido por la conversión de gas a partícula.

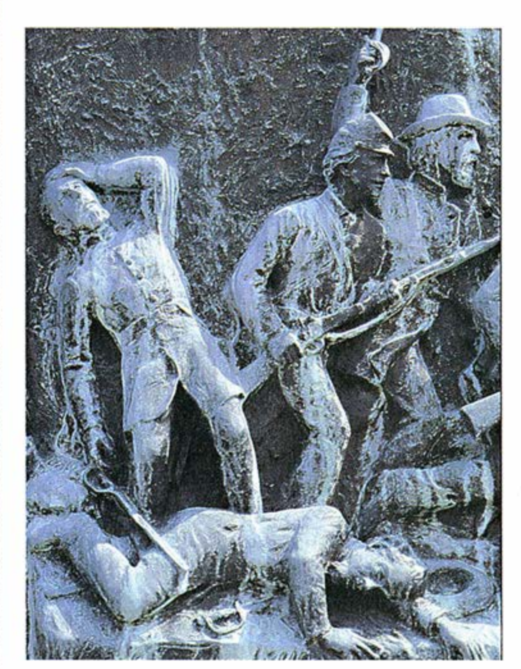
La intensa afinidad química del ácido sulfúrico y sus sales de amonio por el agua reviste especial interés por lo que se refiere a la capacidad del aerosol para dispersar la luz. Cuando las gotículas de solución se mezclan con aire húmedo (en terrenos empantanados u océanos), absorben humedad y crecen. Las partículas mayores dispersan más la luz visible, lo que explica el aumento de la bruma cuando la humedad es alta: si el valor relativo de ésta es del 80 por ciento (valor medio global del aire en la vecindad del suelo), una cantidad dada de sulfato producirá alrededor del doble de la bruma que generaría en un día seco.

Una vez constituidas por reacciones químicas, las partículas de sulfato en la troposfera pueden enfriar el clima de dos maneras: directamente, con cielo despejado, al reflejar parte de la radiación solar incidente; indirectamente, al aumentar la reflectividad de las nubes.

Azufre, lluvia ácida y capa de ozono

El azufre contribuye a la acidez del agua de lluvia y al empobrecimiento de ozono estratosférico. La lluvia ácida tiene bastante que ver con la oxidación del dióxido de azufre en la atmósfera. El proceso de oxidación forma ácido sulfúrico, que origina partículas de aerosol. En la troposfera, estas partículas submicrométricas atraen el agua, y se convierten en núcleos para la condensación de la nube cuando la humedad relativa sobrepasa el 100 por ciento. Las gotículas nubosas incorporan el ingrediente ácido, que se depositará en la superficie terrestre en forma de lluvia o nieve. La acidez industrial puede dispersarse a 1000 kilómetros de su fuente antes de que las partículas precipiten.

Las partículas de sulfato merman la concentración de ozono cuando residen en la estratosfera, la parte de la atmósfera por encima de la troposfera. Depositadas allí sobre todo por enormes erupciones volcánicas, las partículas de azufre presentan el sustrato sobre el que actúan los compuestos destructores de ozono. Se da la paradoja de que los efectos del empobrecimiento en ozono de la estratosfera son en parte compensados por el aerosol de sulfatos en la baja atmósfera. Allí, el aerosol reduce la cantidad de radiación solar ultravioleta que llega al suelo y amortigua así parte del incremento que sería de esperar por la pérdida de ozono estratosférico (aunque sólo donde abunden las partículas de sulfatos).



BRONCE CONMEMORATIVO en el Parque Nacional Militar de Gettysburg decolorado por la lluvia ácida.

En el efecto directo, o de cielo despejado, las partículas de sulfato del aerosol dispersan la luz solar y la devuelven al espacio; como resultado, llega menos radiación solar al suelo. Hay dos modos de evaluar la fracción de la energía solar incidente que se pierde en el espacio. Una consiste en efectuar cálculos ópticos basados en los tamaños de las partículas y los índices de refracción. Otra aproximación, más fidedigna, se limita a usar la correlación observada entre la cantidad de aerosol en la atmósfera y la pérdida de energía causada por la difusión. Estos análisis indican que los sulfatos antropogénicos dispersan alrededor del 3 por ciento del haz solar directo. Un 15 o 20 por ciento de esta cantidad vuelve al espacio, lo que da una pérdida total de alrededor del 0,5 por ciento. La reducción media de la luz solar, no obstante, es la mitad de esta cantidad, pues las nubes cubren casi la mitad de la superficie terrestre. Se calcula que la pérdida de luz solar en el suelo es de un 0,2 a 0,3 por ciento.

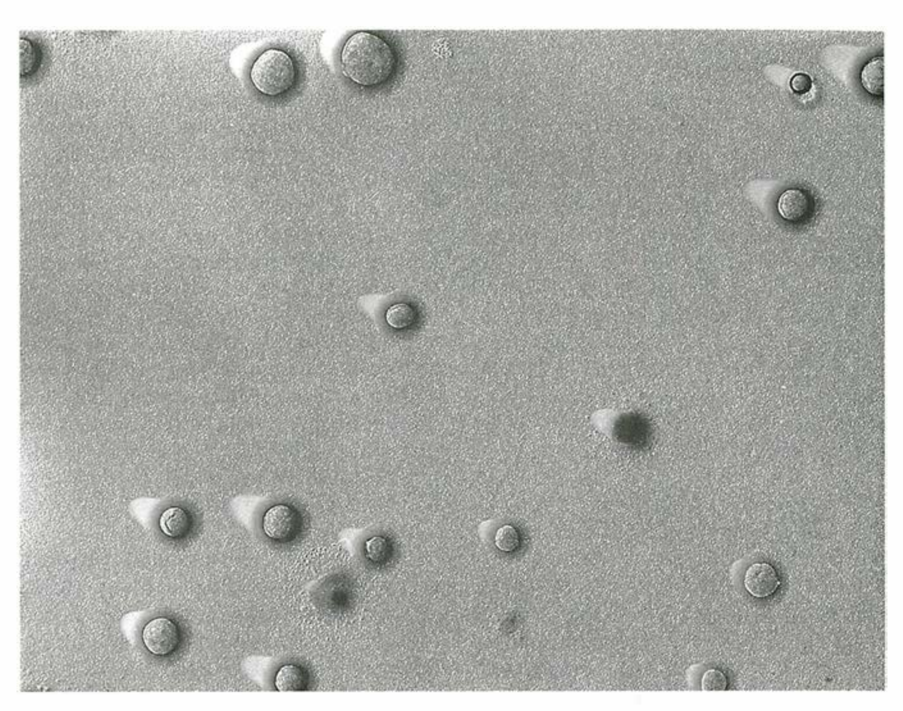
¿Tiene alguna importancia esta pérdida? La radiación solar que llega a la capa de bruma de sulfatos próxima al suelo es de unos 200 watts por metro cuadrado, de modo que la pérdida viene a ser de 0,4 a 0,6 watts por metro cuadrado. Como el hemisferio norte contiene más aerosoles, el estímulo medio tiene que ser mayor allí, probablemente alrededor de un watt por metro cuadrado. (Los meteorólogos usan el término “estímulo” —“forcing”— para referirse al efecto de factores externos a la atmósfera y los océanos en los cambios del balance planetario de energía.)

Tal pérdida de energía incidente, por pequeña que parezca, no deja de tener consecuencias. El aumento de dióxido de carbono procedente de la actividad humana supone una ganancia de 1,5 watts por metro cuadrado en el balance de calor del planeta. (Cuando se consideran otros gases de invernadero, así el metano y el óxido nitroso, el aumento es de unos 2,5 watts por metro cuadrado.) El enfriamiento causado por los aerosoles sulfatados es, pues, comparable en magnitud al calentamiento producido por el dióxido de carbono, al menos en las manchas de bruma concentradas sobre las regiones industriales.

Ni que decir tiene que estos cálculos son burdos. Para cuantificar más precisamente el efecto del aerosol y describir su distribución geográfica, varios investigadores de las universidades de Estocolmo y Washington emplearon un modelo meteorológico desarrollado en el Instituto Max Planck

de Química de Maguncia. Con esta descripción, que detalla la producción química y el transporte por el viento de las partículas a partir del dióxido de azufre antropogénico, pudieron construir un mapa de las variaciones del balance de calor que se debían sólo al efecto directo del sulfato antropogénico. El modelo mostró tres grandes masas de bruma en el hemisferio norte. Una de ellas, sobre el este de los Estados Unidos, produce pérdidas de radiación solar de más de dos watts por metro cuadrado. Las otras dos, sobre Europa y Oriente Medio, devuelven al espacio más de cuatro watts por metro cuadrado. La media sobre el hemisferio norte, basada en las emisiones de azufre registradas en 1980, es de 1,1 watts por metro cuadrado, próxima al tosco cálculo descrito más arriba.

La segunda vía, indirecta, que utilizan los sulfatos de aerosol para enfriar la Tierra es mediante su influencia en el albedo de las nubes. Cuando se encuentran en éstas, algunas partículas de sulfato actúan de núcleos de condensación. La concentración de los núcleos de condensación en las nubes determina el número y tamaño de las gotículas en ellas. Para una cantidad dada de agua condensada, la concentración afecta a su vez al albedo de la nube. Bastaría sólo con un 30 por ciento de aumento del albedo de las nubes sobre los océanos para compensar el calentamiento medio debido al crecimiento antropogénico del dióxido de carbono durante este siglo.



3. MUESTRA DE AEROSOL DE SULFATO tomada de la atmósfera y fotografiada en un microscopio. Las partículas miden 0,1 micrometros de diámetro.

Este efecto indirecto de las partículas de sulfato se ha venido resistiendo a una cuantificación con garantías. Aunque las observaciones muestran que los núcleos de condensación en las nubes abundan más sobre las regiones industrializadas, se desconoce la relación de las diferencias en el número de núcleos con las variaciones de la cantidad o masa de los aerosoles antropogénicos. No podemos, pues, estimar la magnitud del estímulo indirecto de los aerosoles. Las observaciones mediante satélites sugieren que el efecto no es enorme, pero los análisis teóricos le atribuyen una importancia similar a la del estímulo directo.

En vista de que la capacidad de reproducir con modelos los efectos meteorológicos de los aerosoles es limitada, cabe preguntarse si de verdad hay enfriamiento por aerosoles. En concreto, ¿qué dicen del mismo los archivos de observaciones meteorológicas? Para responder, compararemos las variaciones en el hemisferio norte con las del hemisferio sur. En conjunto, el globo se ha calentado aproximadamente 0,5 grados durante los últimos 100 años. Si el refuerzo del efecto de invernadero (esto es, el calentamiento adicional causado por la actividad humana) fuese el único mecanismo de estímulo climático, el hemisferio norte debería calentarse un poco más rápidamente que el hemisferio sur, porque éste contiene la mayor parte de los océanos del mundo y, en consecuencia, es mayor su inercia respecto a las variaciones térmicas.

De las observaciones se desprende lo contrario. Desde 1940, el hemisferio norte se ha calentado más lentamente. La fuerte tendencia al calentamiento que se produjo a principios de siglo en el hemisferio norte cesó hacia 1940 y no se reanudó hasta mediados los años setenta, aun cuando las emisiones industriales de gases de invernadero habían seguido aumentando a lo largo de todo ese período. Esa detención del calentamiento pudo deberse, en parte al menos, a las propiedades compensadoras del aerosol de sulfatos. Aunque las variaciones concuerdan en líneas generales con el supuesto enfriamiento por aerosol, no bastan para demostrar que exista una relación causal. (La falta de una neta diferencia entre el curso de los calentamientos de los dos hemisferios a lo largo de todo el siglo XX impone un límite superior a la magnitud total del estímulo del aerosol, lo que implica una exigua contribución del albedo de las nubes.)

Otra prueba circunstancial proviene de un análisis realizado por el Comité Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC). En 1990, el comité señaló una discrepancia entre los cambios de la temperatura media observados y las predicciones de los modelos climáticos. Estos indicaban que el planeta debía haberse calentado algo más rápidamente de lo que los archivos registran. Quizá el aerosol de sulfatos sirva para explicar la discrepancia.

Para entender la razón, necesitamos introducir la noción de "sensibilidad climática". En las simulaciones del clima por ordenador, se duplica la concentración del dióxido de carbono y se deja entonces que el sistema climático se ajuste al nuevo, y más cálido, régimen estacionario. La variación de la temperatura media global es una medida de la sensibilidad de dicha temperatura al estímulo externo. La "mejor previsión" del IPCC es de 2,5 grados Celsius para esta magnitud, aunque la sensibilidad puede variar desde 1,5 hasta 4,5 grados Celsius. Cuando se comparan las observaciones con los resultados de los modelos climáticos ideados específicamente para prever la respuesta, dependiente del tiempo, a las variaciones observadas del estímulo de los gases de invernadero, la sensibilidad climática que se obtiene resulta ser un poco inferior a 1,5 grados C. Dicho de otra manera, la evaluación empírica de la sensibilidad climática da un valor que está más de un grado por debajo de la mejor previsión del IPCC y ligeramente por debajo del margen esperado.

Estas cifras abonan la posibilidad

de que el calentamiento global inducido por los gases de invernadero supere los 0,5 grados observados y haya sido en parte compensado por algún proceso de enfriamiento. La variabilidad natural del clima podría ser suficiente para explicar el enfriamiento. Podría haber otros procesos externos responsables. El efecto de los aerosoles es un candidato obvio; al introducir el enfriamiento por aerosoles en los modelos resulta un valor de la sensibilidad climática que está un poco por encima de la mejor previsión del IPCC, pero a todas luces dentro del dominio esperado.

Pese a la debilidad de los datos, los indicios apuntan hacia una apreciable influencia de los aerosoles sobre el clima, comparable a la que producen los gases de invernadero: desde 1880 hasta 1970, el enfriamiento por los aerosoles quizá haya compensado, más o menos, el refuerzo del efecto de invernadero en el hemisferio norte (desde 1970, las emisiones de gases de invernadero han crecido más deprisa que las de partículas de aerosol). En algunas regiones el enfriamiento causado por los aerosoles podría predominar incluso. Jeffrey T. Kiehl y Bruce P. Briegleb señalan que los aerosoles producen un enfriamiento neto en regiones definidas del este de los EE.UU., parte meridional de Europa Central y China oriental.

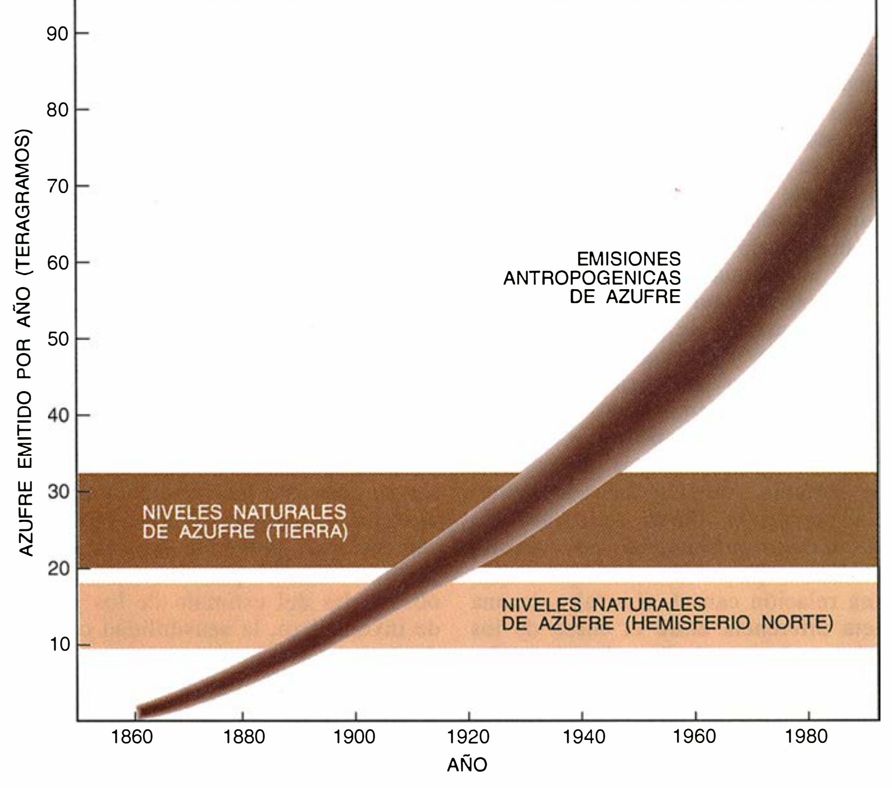
Hay una complicación crítica, no obstante, escondida tras el empleo de la palabra "compensar". El término es engañoso. El enfriamiento por aerosoles y el efecto de invernadero tienen características que impiden que uno de ellos compense limpiamente al otro. Primero, el enfriamiento y el calentamiento acontecen, en su mayor parte, sobre diferentes regiones del globo. Los sulfatos suelen darse sobre las zonas industriales del hemisferio norte. Aunque el dióxido de carbono se distribuye por toda la atmósfera, el estímulo del invernadero es más potente sobre los océanos subtropicales y los desiertos.

Ambos tipos de estímulo difieren también en el tiempo. La capacidad de aprisionar calor característica del dióxido de carbono no varía mucho durante el día y a lo largo del año; por contra, el efecto del aerosol tiene un marcado carácter diurno y estacional: actúa con mayor vigor en el invierno y sólo opera en las horas de sol. El grupo de Thomas R. Karl ha mostrado que los Estados Unidos, la antigua Unión Soviética y China han exhibido aumentos de las temperaturas mínimas medias anuales, pero no aumentos de las temperaturas máximas. Es posible, por tanto, que los aerosoles vayan en estos momentos compensando el calentamiento de invernadero durante el día (cuando se dan las temperaturas más altas), pero no por la noche (cuando baja más la temperatura).

¿Cómo deben interpretarse los datos acopiados sobre enfriamiento por aerosoles? Para juzgarlos, conviene compararlos con el refuerzo del efecto de invernadero. Aunque la IPCC recomienda recortes a gran escala en las emisiones de dióxido de carbono, no ha podido asegurar de forma concluyente que las variaciones en las concentraciones de los gases de invernadero hayan causado el calentamiento global que se observa. No es fácil dictar un veredicto definitivo, porque la magnitud del efecto viene a ser hasta ahora comparable con la variabilidad natural del clima.

Nos hallamos ante una situación idéntica al abordar el estímulo del aerosol en el clima. Los expertos no han descubierto todavía una prueba tangible e irrefutable de enfriamiento por los sulfatos. No obstante, la sólida base teórica del efecto del aerosol, la concordancia de los datos con los efectos esperados y la falta de pruebas en contrario respaldan nuestra confianza en su realidad. Pero hay dos grandes zonas de incertidumbre que limitan nuestra capacidad predictiva: el conocimiento de los fundamentos físicos del cambio climático global y la predicción del nivel de las futuras emisiones de dióxido de azufre. En este momento, la incertidumbre estimada en la cuantía del estímulo producido por el aerosol antropogénico mejor conocido —el de sulfatos— es mucho mayor que la incertidumbre relativa al estímulo creado por los gases de invernadero. Para los sulfatos, la cuantía del enfriamiento se conoce con un factor de incertidumbre de dos (vale decir, puede hallarse entre el doble y la mitad del valor estimado); para los gases de invernadero, el grado de calentamiento se conoce con una aproximación de entre una quinta y una décima parte.

Ello no obsta para que avancemos algunas predicciones generales. Como el aerosol antropogénico se concentra en buena parte en zonas específicas del hemisferio norte, el efecto de calentamiento debería seguir su curso, sin gran perturbación, en el hemisferio sur (y en las porciones más rurales del hemisferio norte). La predicción del IPCC de un aumento del nivel del mar en algunas decenas de centímetros a lo largo de los próximos 50 años sigue, pues, siendo razonable. Una fracción sustancial de esta ele-



4. LAS EMISIONES ANTROPOGENICAS DE AZUFRE sobrepasan las emitidas por fuentes naturales, tales como el fitoplancton marino. Se calcula que los humanos liberan entre 65.000 millones y 90 billones de gramos de azufre cada año.

¿Cuánta luz reflejan los aerosoles?

El aerosol atmosférico de sulfatos difunde la luz en todas las direcciones. Alrededor del 15 al 20 por ciento de la luz torna al espacio: la retrodifusión es el efecto directo del aerosol atmosférico sobre la radiación incidente. El rendimiento difusor del aerosol, representado por α, es alto incluso con baja humedad: cada gramo denota un área de unos cinco metros cuadrados. La humedad aumenta la difusión al provocar la dilatación del aerosol. Para la humedad relativa media global, el rendimiento se duplica, hasta casi 10 metros cuadrados por gramo. Se puede usar este valor para calcular el efecto directo del aerosol antropogénico de sulfato.

La tasa a la cual el haz solar pierde luz define el coeficiente de difusión, representado por σ y expresado en unidades de inverso de metro. Este valor está determinado por la masa presente de aerosol, M (en gramos por metro cúbico), multiplicada por el rendimiento de difusión: $\sigma = \alpha M$. Cuando ambos miembros de esta ecuación se integran respecto a la altura, z, resulta una magnitud adimensional llamada opacidad, espesor óptico o profundidad óptica del aerosol, que se representa por δ:

$$\int_0^\infty \sigma \, dz = \delta = \alpha \int_0^\infty M \, dz = \alpha B$$

Aquí B denota el valor medio mundial de la carga de aerosol antropogénico de sulfato en una columna de aire en gramos por metro cuadrado. La opacidad se introduce después en la ley de Beer (que describe la transmisión de la luz a través de todo el espesor vertical de la atmósfera). La ley da $I / I_0 = e^{-\delta}$, donde I es la intensidad de la radiación transmitida, I_0 es la intensidad incidente en la cima de la atmósfera y e es la base de los logaritmos neperianos. En el caso más sencillo, cuando la opacidad es mucho menor que la unidad, δ es la fracción de la luz del haz solar que se pierde por difusión. ¿Qué valor tiene δ o, más precisamente, qué parte de ella se debe al sulfato antropogénico?

Para calcular la carga media global de aerosol de sulfato antropogénico se considera la totalidad del volumen de la atmósfera como una caja. Por ser corta la vida media del aerosol de sulfato, entonces la suma de todo el sulfato de origen humano que se crea en la atmósfera en un año, Q, y su vida media en la caja, t, junto con la superficie de la Tierra, determinan B:

$$B = \frac{Qt}{\text{área de la Tierra}}$$

Alrededor de la mitad de las emisiones antropogénicas de dióxido de azufre se convierten en aerosol de sulfato: se están convirtiendo químicamente en sulfato, por año, 35 teragramos (35×10^{12} gramos) de azufre en forma de dióxido de azufre. Como la masa molecular del sulfato es tres veces la del azufre elemental, Q es $(3)(35 \times 10^{12})$ o $1{,}1 \times 10^{14}$ gramos por año. El estudio de los sulfatos en la lluvia ácida ha mostrado que éstos persisten en el aire durante unos cinco días, o 0,014 años. La superficie de la Tierra es de $5{,}1 \times 10^{14}$ metros cuadrados. Sustituyendo estos valores en la ecuación de B se obtiene que la carga de aerosol es de unos $2{,}8 \times 10^{-3}$ gramos por metro cuadrado.

Esta cantidad de materia, aparentemente insignificante, produce un valor pequeño, aunque apreciable, para la opacidad del aerosol. Usando un valor del rendimiento de difusión a de cinco metros cuadrados por gramo y un factor de dos para el aumento del coeficiente de difusión como consecuencia de la humedad relativa, la opacidad antropogénica estimada resulta ser $\delta \approx 5 \times 2 \times (2{,}8 \times 10^{-3}) \approx 0{,}028$. Este valor significa que alrededor del 3 por ciento del haz solar directo deja de llegar a la superficie de la Tierra por culpa del sulfato antropogénico. Una cifra menor —tal vez (0,15)(3 por ciento), esto es, alrededor de 0,5 por ciento— se pierde, por tanto, en el espacio. Esta difusión actúa sobre las partes de la Tierra no cubiertas por nubes. Alrededor de la mitad de la superficie terrestre está cubierta por nubes en cualquier momento, de modo que globalmente se pierde del 0,2 al 0,3 por ciento.

vación está asociada a la dilatación térmica global del agua al calentarse. Otras repercusiones son algo más difíciles de predecir, porque dependen de la situación regional de la combinación de los estímulos del aerosol y del efecto de invernadero.

La reducción de las emisiones de dióxido de carbono y de dióxido de azufre produciría dos resultados contrapuestos. Como el ciclo del carbono y el sistema climático responden con lentitud a los cambios, el calentamiento inducido por el dióxido de carbono continuaría durante decenios. En contraste, la reducción de las emisiones de dióxido de azufre se traduciría rápidamente en el cese del enfriamiento a causa de la corta vida media del aerosol de sulfato en la atmósfera. Así, el paradójico resultado de restringir el uso de carburantes fósiles podría ser, al principio, un calentamiento, en particular en las regiones industriales.

Quedan abiertas muchas cuestiones sobre el estímulo climático y el azufre. ¿Tienen otras fuentes de aerosoles, tales como la gran combustión de biomasa en los trópicos, un impacto mayor que el que se suele atribuir? Y lo que es aún más importante: ¿cómo responden los procesos meteorológicos a un estímulo que no actúa de manera uniforme sobre la superficie de la Tierra?

Podríamos sentir la tentación de concluir que tanta incertidumbre deja sin resolver la cuestión del cambio climático inducido por el hombre; y, en consecuencia, aducir que no hace falta pensar en cambios de política. Pero esa línea de razonamiento incurre en un serio error. Está claro que no se nos presenta panacea alguna que remedie el problema del cambio global. Por ejemplo, reducir las emisiones de dióxido de azufre para disminuir la lluvia ácida podría aumentar el calentamiento global. Lo que parece fuera de duda es que se necesitan mayores conocimientos y que debe seguirse una senda cautelosa. Se pueden esgrimir muchos y buenos argumentos en favor de la conservación de los combustibles fósiles y de la reducción de las emisiones tanto de dióxido de carbono como de dióxido de azufre. Hacerlo así cuanto antes sería menos perturbador para el clima que esperar, porque el efecto de los gases industriales que se emitan hoy persistirá durante decenios. Cuanto más se tarde en emprender reducciones, tanto más graves serán las consecuencias.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

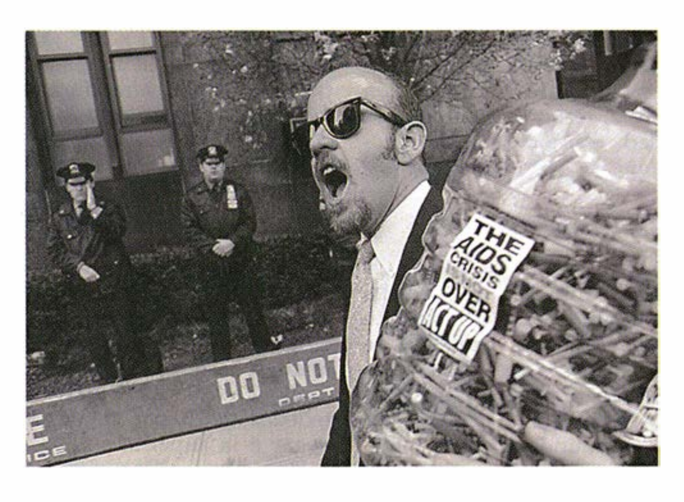
CLIMATE CHANGE: THE IPCC SCIENTIFIC ASSESSMENT. Dirigido por J. T. Houghton y col. Cambridge University Press, 1990. Y: CLIMATE CHANGE 1992: THE SUPPLEMENTARY REPORT TO THE IPCC SCIENTIFIC ASSESSMENT. Dirigido por J. T. Houghton y col. Cambridge University Press, 1992.

THE RELATIVE ROLES OF SULFATE AEROSOLS AND GREENHOUSE GASES IN CLIMATIC FORCING. J. T. Kiehl y B. P. Briegleb en *Science*, vol. 260, págs. 311-314; abril de 1993.

Sida e inyección de drogas

La pandemia del sida sigue extendiéndose entre los drogadictos, pero podría frenarse si los gobiernos se mostraran proclives a adoptar programas de prevención más eficaces

Don C. Des Jarlais y Samuel R. Friedman



Las minúsculas transfusiones de sangre que se producen cuando los drogadictos comparten las jeringas bastan, por sí solas, para transmitir enfermedades. Nada ha corroborado esa afirmación con mayor dramatismo que la rápida propagación del virus de la inmunodeficiencia humana y agente causal del sida, o VIH. En medio centenar largo de países se ha demostrado la infección sídica entre personas que se inyectan drogas ilícitas. Hay una treintena más donde se practica la inyección de sustancias ilegalizadas; estas naciones tienen, pues, grupos humanos con gravísimo riesgo de contraer o transmitir el virus del sida. Una vez establecido el VIH en esos grupos, se propaga entre la población a través de las relaciones sexuales y el embarazo.

No existen cifras mundiales sobre el número de consumidores de droga; el cálculo más aproximado los sitúa en unos cinco millones de personas. Pero sí disponemos de cifras precisas sobre el efecto del sida en ese segmento concernientes a ciertos países; en Estados Unidos más de una tercera parte de todos los casos de sida, en torno a 113.000, están asociados con la inyección de sustancias ilícitas. Aun careciendo de cifras definitivas, es evidente que la difusión del virus entre los drogadictos se ha convertido también en una catástrofe internacional. Las predicciones más cautas de las instituciones de salud pública prevén un aumento del consumo de drogas, vía inyección, en muchos países y una mayor transmisión del VIH entre las personas que utilizan ese medio para drogarse.

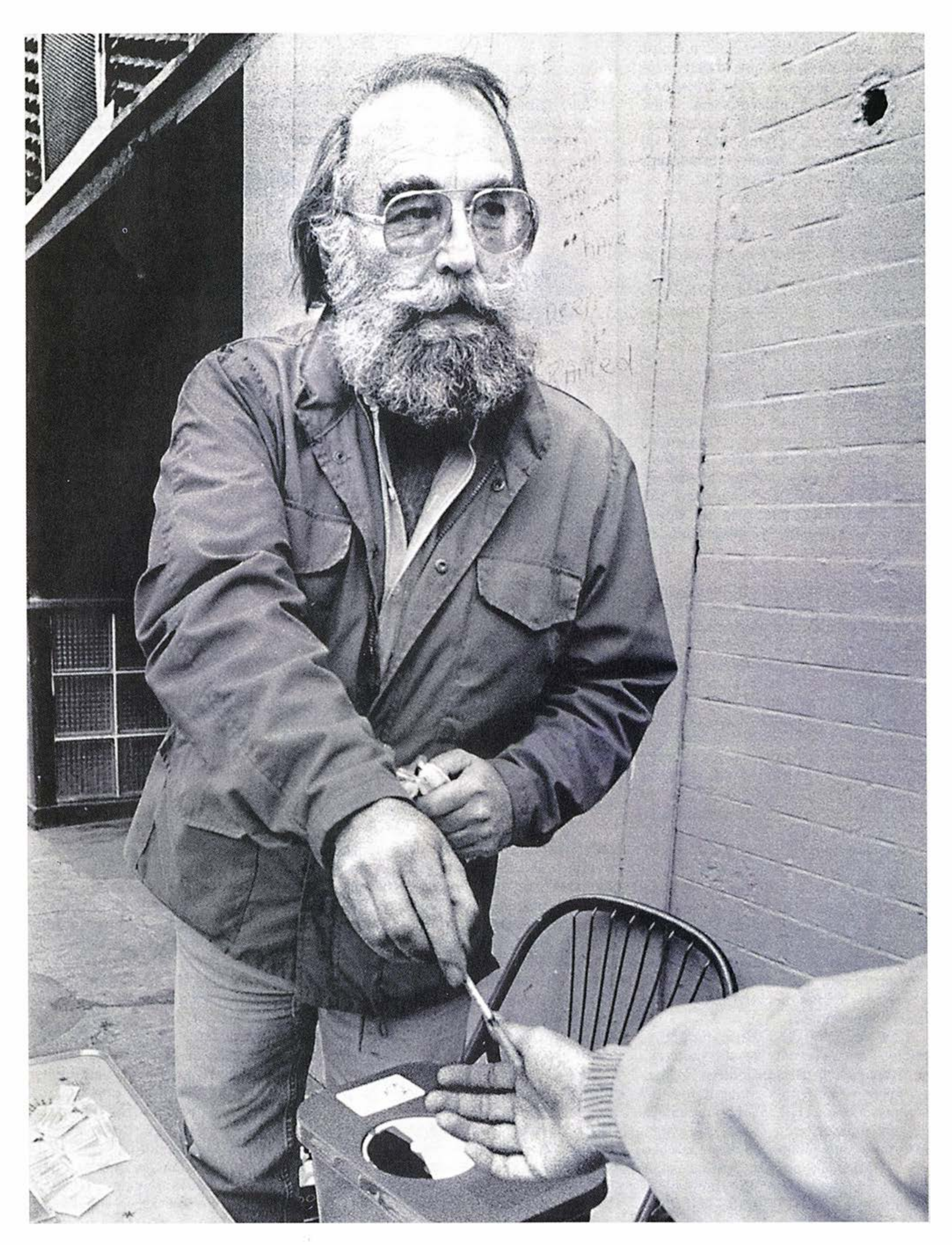
Afortunadamente, los esfuerzos de instituciones sanitarias de Norteamérica, Europa y Australia demuestran que se puede frenar la expansión de la epidemia del sida entre quienes se inyectan droga. En ocasiones, sin embargo, la falta de decisión política acaba por anular esas prometedoras perspectivas. En vez de diseñar políticas que permitan detener la expansión del VIH, muchos responsables de la sanidad pública ponen todo su ahínco en evitar la polvareda que levanta lo relativo al consumo de drogas.

Confiamos en que el conocimiento de los alentadores resultados obtenidos con los programas pilotos y otros realizados a gran escala induzca a las autoridades a primar las políticas que aborden este aspecto de la pandemia del sida. Revisaremos aquí una serie de estrategias a cuya implantación general y desarrollo debería aspirarse antes de que resulte incontrolable la epidemia entre quienes se inyectan droga, sus parejas sexuales y sus hijos. (Cuando aquí hablamos de "inyección" nos referimos no sólo a la intravenosa, sino también a la muscular o subcutánea.)

Muchas manifestaciones del sida observadas en quienes se inyectan la droga difieren bastante de las aparecidas en varones homosexuales y bisexuales que no utilizan esta vía. Entre los primeros los signos de la enfermedad van más allá de las infecciones oportunistas y del sarcoma de Kaposi que venían considerándose tradicionalmente como base para diagnosticar el sida. La diferencia del diagnóstico tiene una explicación histórica: cuando se formularon las primeras definiciones del sida, el Centro norteamericano para el Control de las Enfermedades (CCE) investigó el curso de la epidemia a través, sobre todo, de varones homosexuales y bisexuales.

Los estudios dirigidos por nuestro grupo de investigación y por Peter A. Selwyn y Gerald Friedland, del Hospital Yale-New Haven, junto con sus colaboradores del Hospital Montefiore de Nueva York, han demostrado que la infección por el VIH en quienes se inyectan drogas y en sus parejas sexuales se asocia con altísima morbilidad y mortalidad por infecciones bacterianas. Los enfermos contraen neumonías y endocarditis (inflamación de la membrana interna del corazón). En Estados Unidos, el repunte de la tuberculosis se asienta, sobre todo, entre los drogodependientes infectados por VIH que viven en condiciones de hacina-

DON C. DES JARLAIS y SAMUEL R. FRIEDMAN estudian la adicción, su tratamiento y la infección por el virus de la inmunodeficiencia entre los consumidores de drogas. Des Jarlais es director de investigación en el instituto de quimiodependencia adscrito al Hospital Beth Israel. Friedman, contratado por el Instituto de Investigación y Desarrollo Nacional, ha sido consejero de la Organización Mundial de la Salud.



1. PROGRAMAS DE INTERCAMBIO DE AGUJAS, como éste que se lleva a cabo en Tacoma (*arriba*), tratan de frenar la expansión del sida entre quienes se inyectan drogas y entre sus compañeros sexuales. Los responsables de la salud pública intentan impedir que los drogadictos compartan agujas contaminadas por el virus del sida. Pero las medidas tomadas han sido a veces objeto de controversia, lo que explica las manifestaciones en apoyo de su legalización (*página opuesta*).

miento sin acceso a una buena atención médica. También hay indicios de que la infección por dicho virus aumenta la gravedad y la frecuencia de enfermedades ginecológicas, entre ellas el cáncer cervical y la enfermedad inflamatoria pélvica. Más del 80 por ciento de las mujeres estadounidenses que son VIH-positivas se inyectan drogas o forman pareja con personas que lo hacen.

La definición de sida avanzada por el CCE se ha ido actualizando de forma periódica para incorporar esos descubrimientos. En la revisión de 1993 se incluye un diagnóstico de sida basado exclusivamente en una inmunosupresión grave; es decir, un recuento de células CD4 inferior a 200 por microlitro de sangre. (Las células CD4 son un tipo de leucocitos que, en condiciones normales, intervienen en la protección del organismo ante la infección.) Este criterio proporciona un enfoque alternativo al diagnóstico del sida fundado en una lista de infecciones oportunistas y neoplasias en continuo cambio.

Hay dos vías predominantes por las que el VIH se introduce en las poblaciones de drogadictos. El virus puede entrar a través de grupos que se superponen, o grupos puente; por ejemplo, varones que se inyectan drogas y además mantienen relaciones sexuales con otros hombres. Esta es la forma de transmisión que parece haber ocurrido en Nueva York, Río de Janeiro y Sidney. La segunda vía opera a través de los viajes. A diferencia de la visión estereotipada que se suele tener de quienes toman drogas por inyección, muchos viajan con frecuencia, por negocios o por placer. Así, en un estudio reciente se comprobó que, en los dos últimos años, el 62 por ciento de los drogadictos berlineses se habían inyectado drogas fuera de su ciudad natal y que el 14 por ciento de los neoyorquinos lo habían hecho fuera de los lindes municipales.

Una vez que el VIH se ha introducido en un grupo de drogadictos, se propaga con suma rapidez. Se han observado aumentos inmediatos de seroprevalencia del VIH (porcentaje de consumidores de droga que están infectados) lo mismo en las naciones industrializadas que en las que están en vías de desarrollo. En Bangkok y Edimburgo y en el estado indio de Manipur, la seroprevalencia del VIH entre los drogadictos ha crecido del 0 al 40 por ciento en dos años escasos.

Esta rápida transición suele ir asociada con ciertas clases de comportamiento: el refugio en “galerías para pincharse” y “la chuta del traficante”. Las primeras son lugares donde los consumidores alquilan las agujas y las jeringas, se inyectan la droga por vía cutánea y luego devuelven el equipo al “encargado” de la galería, que lo alquila a otros clientes. El pago puede hacerse en metálico o en drogas. La germanía “chuta del traficante” designa las agujas, jeringas y demás útiles que un vendedor presta a un cliente, recupera y luego ofrece al siguiente.

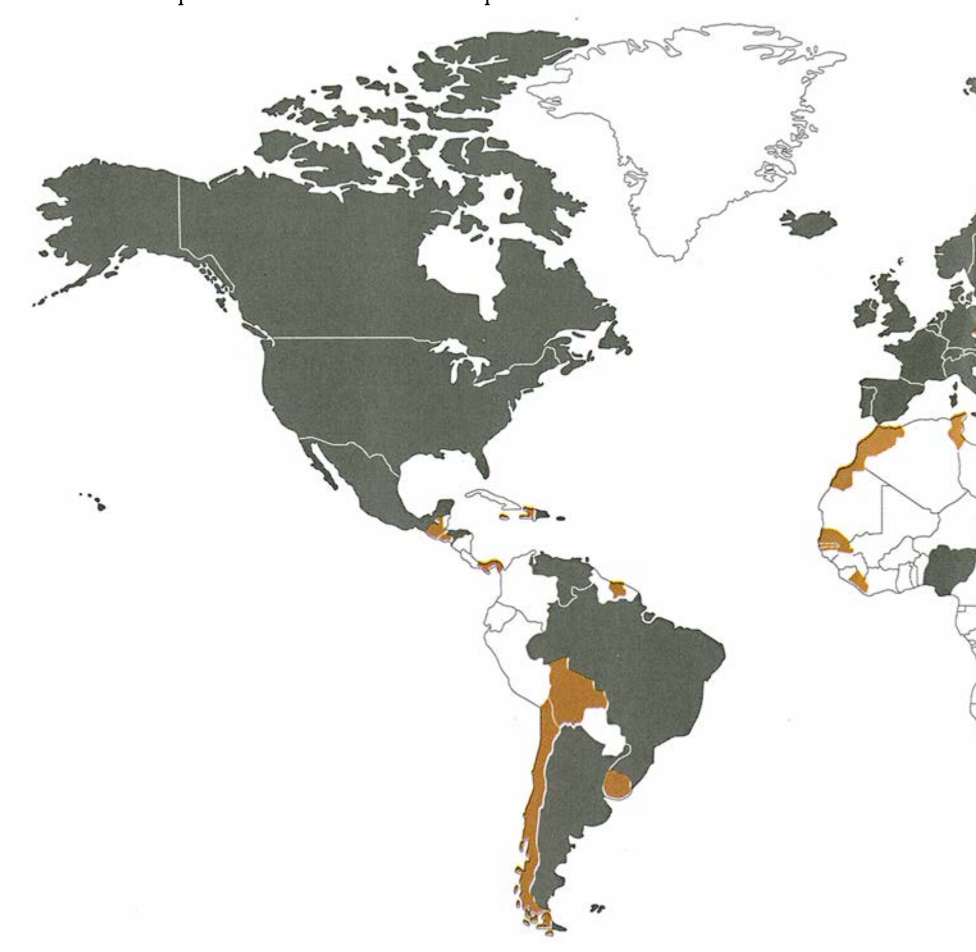
Las galerías y el equipo prestado por los traficantes desempeñan varias funciones en la subcultura de la droga. Constituyen una expendeduría de agujas y jeringas, que suelen ser escasas por la restricción legal que pesa sobre su venta. Así, en la mayoría de los estados federados de la Unión donde abunda la población drogadicta se exige receta para la venta de agujas y jeringas. En otros estados y en muchos países está permitida la venta sin receta, pero los farmacéuticos se muestran reacios a venderlas a las personas cuyo consumo de drogas ilegales sospechan.

La existencia de “galerías” libera a los consumidores de la necesidad de cargar con el equipo. En casi todo el territorio de los EE.UU. está prohibida la posesión de equipo para la administración de narcóticos. En los países donde la posesión es legal, muchos drogadictos prefieren no llevar consigo el armamentario por temor a que la policía los detenga ante la sospecha de que se dediquen a actividades ilegales. Guardar las agujas en casa salva alguna de estas dificultades, pero esa práctica puede provocar enfrentamientos entre el consumidor de droga y su entorno familiar.

Al tiempo que las galerías y el

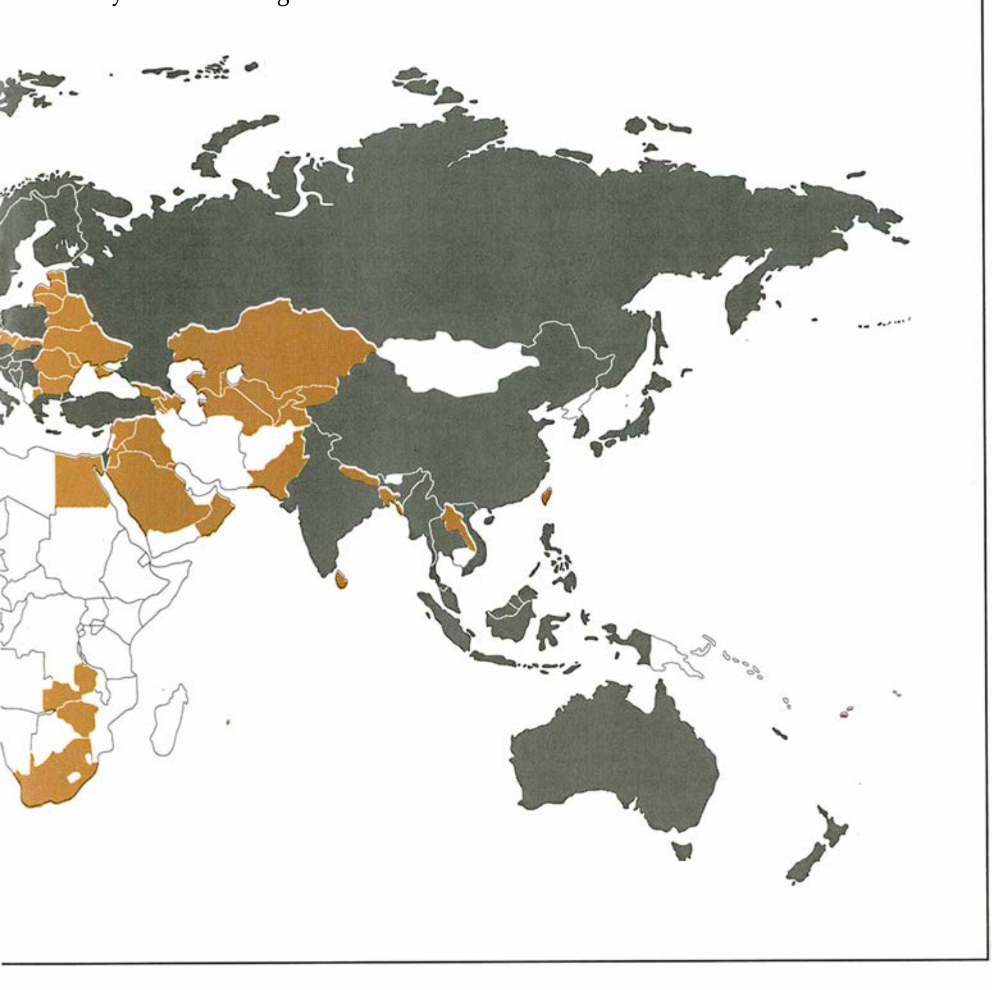
Inyección de drogas

La inyección de drogas va asociada a la infección por el VIH en muchos países (*negro*), mientras que en otros esa forma de consumo no está todavía ligada al sida (*marrón*). Según la Organización Mundial de la Salud, unos 15 millones de personas están infectadas por el virus de la inmunodeficiencia



e infección del sida

humana, pero no está claro cuántas de ellas lo fueron a través de una inyección o mediante el mantenimiento de relaciones sexuales con un adicto. En EE.UU., sin embargo, una tercera parte de todos los casos de sida pueden atribuirse a la inyección de drogas.



equipo prestado por los traficantes resolvían un problema a los drogadictos, sirvieron también de vectores para la inoculación de la hepatitis y otras infecciones transmitidas por vía sanguínea. El equipo de inyección lo suelen compartir docenas de drogadictos que carecen de relación social mutua y, por tanto, no conocen sus situaciones con respecto al VIH ni los comportamientos de riesgo que entrañan. Los materiales se usan una y otra vez hasta que la aguja o la jeringa se rompen o se tiran por quedar obstruidas con sangre seca. Con la llegada del sida, ese escenario del submundo ha adquirido tintes terroríficos.

Las razones de la generalización de la inyección como forma de administración de la droga ilegal es un tema que requiere una urgente investigación, aunque algunas características de su atractivo parezcan obvias. Durante la primera mitad del siglo XX, el consumo de drogas por inyección era bastante insólito fuera de EE.UU., pero, como ocurre con muchos aspectos de la cultura americana (desde las camisetas y vaqueros de los adolescentes hasta la comida rápida), esta práctica se ha adoptado en muchos países.

La prohibición que pesa sobre el consumo y distribución de cocaína, heroína y drogas afines estimula severas restricciones legales que elevan el coste de las sustancias ilícitas para el consumo sin receta médica. La inyección constituye una manera de economizar. Las formas inyectables de opiáceos y la coca se presentan en una concentración superior que en el caso de las formas tradicionales, como el opio o el té de coca. La inyección proporciona un efecto intenso y económico, potenciando la cantidad de droga que llega al cerebro. Según dicen quienes inhalan o fuman drogas, si se la inyectan necesitan sólo una tercera parte para conseguir el mismo efecto.

Al estar concentradas, las formas inyectables de las drogas ilícitas tienen un volumen relativamente pequeño y son más fáciles de transportar. Puede incluso seguirse el movimiento del VIH a lo largo de rutas de distribución de la droga. Una vez establecido en el Triángulo de Oro del Sudeste asiático —la región donde convergen Tailandia, Myanmar y Laos— el virus se irradia, hacia el oeste, por el noreste de India, hacia el sur por Tailandia, Malasia y Vietnan y hacia el este a través de China meridional y Hong Kong. El virus ha viajado también a lo largo de las rutas de la cocaína en Brasil.

Cuando se detectó el sida entre quienes se inyectaban droga nadie creía en la capacidad de éstos para cambiar de conducta. Escepticismo que se fundaba en otro estereotipo: los drogadictos no se preocupan en absoluto por su salud. La realidad ha desmentido esos prejuicios, afortunadamente.

En Nueva York y otras ciudades, los consumidores modificaron sus hábitos antes de que se implantara ningún programa de prevención formal. Basándose en la información obtenida a través de los medios de comunicación y las redes informales de la subcultura de la droga, empezaron a utilizar agujas esterilizadas obtenidas por caminos heterodoxos. Las estadísticas hablaron de una consiguiente caída del riesgo de sida de un 80 por ciento entre los drogodependientes de Nueva York, de un 84 por ciento entre los de Glasgow, un 82 por ciento en Lund, un 84 por ciento en Sidney y un 73 por ciento en Tacoma, Washington. Se han observado medidas similares en comunidades del continente asiático. Estos datos dejan claro que los drogadictos intentan reducir el riesgo, pero su éxito depende de que logren agujas estériles.

Los programas de prevención han demostrado también que se pueden alentar los cambios de conducta entre los adictos a las drogas. Sin embargo, estos servicios no han recibido siempre la atención política, o la financiación, que merecen por la dificultad que entraña cuantificar su eficacia. La falta de grupos de control crea problemas de medida. Ni es fácil evaluar los cambios de comportamiento inducidos por los programas de prevención, ya que cada estudio emplea unidades distintas para medirlos. Peor todavía, rara vez la

transmisión real del virus se ha convertido en último objetivo de tales trabajos.

Pese a estos problemas metodológicos, podemos avanzar algunas generalizaciones sobre el desarrollo de programas eficaces de prevención del sida. En primer lugar, los adictos que se inyectan pueden aprender los puntos esenciales de la transmisión del VIH y evitar en algo la exposición al virus. Se ha comprobado, a este respecto, que el 93 por ciento de los consumidores de un centro de mantenimiento con metadona conocía el sida y que el 59 por ciento había procurado protegerse de la infección. En segundo lugar, los programas son más eficaces si en su diseño y realización participan los propios afectados. En tercer lugar, los programas deben proporcionar los medios que permitan el cambio de comportamiento, por ejemplo, el tratamiento de quienes deseen limitar el consumo de drogas o abandonarlo, así como el acceso a instrumentos esterilizados y preservativos. En cuarto lugar, hay que ofrecer opciones sobre las preferencias para reducir las posibilidades de transmisión: no hay solución única que sirva para todos. Por último, es evidente que hasta la fecha ningún programa, ni combinación de ellos, ha podido eliminar por completo las conductas de alto riesgo.

Porcentaje de drogadictos infectados con el VIH*

	1978	'79	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91
AMSTERDAN									33	31	31	34		
BANGKOK										1	43			
BERLIN								31	49	49	45			
BILBAO							42	42		44	45	27	30	
BOLONIA		0	0	9	7.5	39	37							
DETROIT								13		16		16		
EDIMBURGO					0	14	42	37						
GINEBRA				7		27		52						
HAMBURGO								0	23	16	13			
LONDRES								5	6	4	5			
MANIPUR									0	0	0		54	
MILAN				11	28	61	67	69	73					
NUEVA YORK	9	26	38		50		57		55				50	
PADUA						20	28	65	50					
RIO DE JANEIRO									4				20	37
ROMA								34	42	33	31	32		
SAN FRANCISCO									7	12	12	11		
CERDEÑA	0	0	0	1	10	18	32	43	57					
TOURS					0	0	15	17						
VIENA									7	12	30	28	24	

*Las cifras proceden de múltiples fuentes, entre ellas historias clínicas, muestras de sangre almacenada y programas de tratamiento. La información es incompleta porque no se realizaron estudios todos los años.

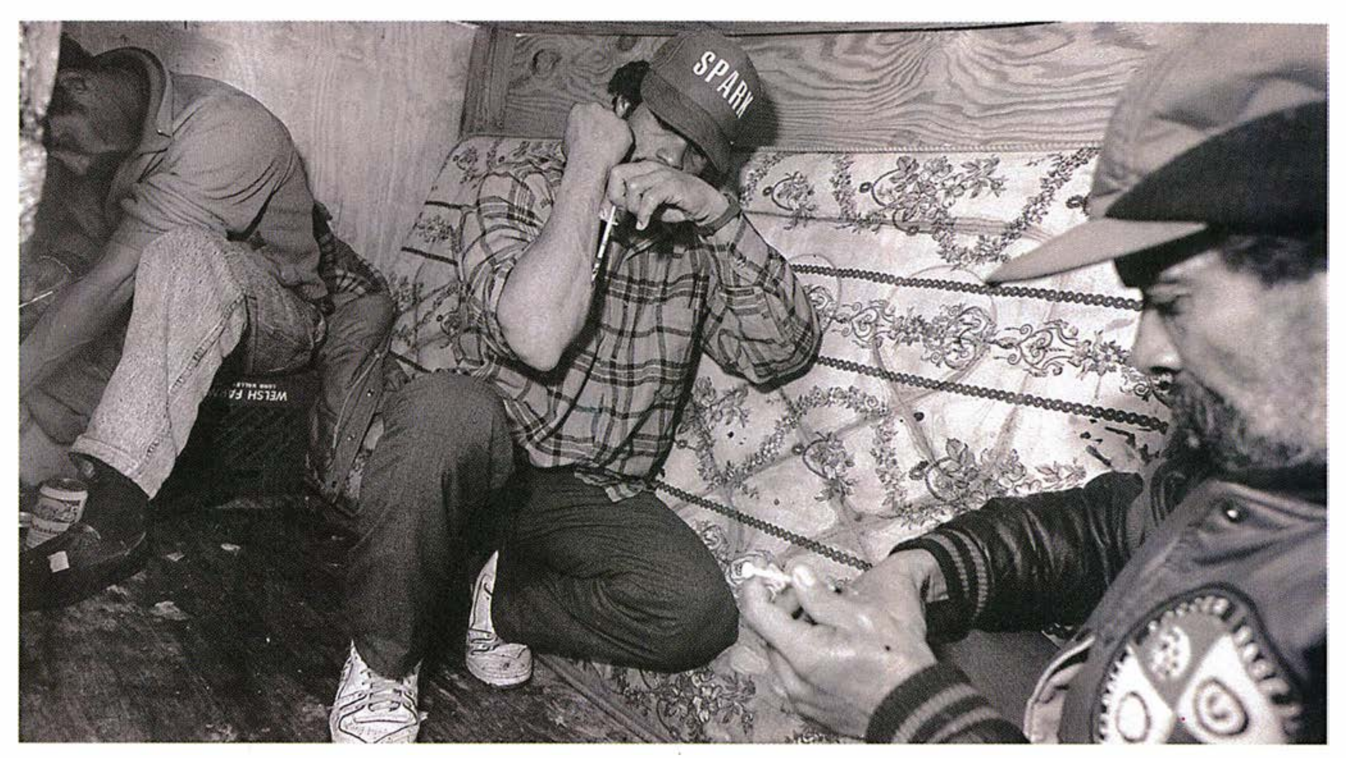
Al analizar los programas, se advierte que su éxito parece depender de cuándo se pusieron en marcha; es decir, si se establecieron en una etapa en que el índice de infección vírica era mínimo o si se implantaron después de que el VIH se hubiera afianzado en la comunidad. Hemos investigado recientemente la relación entre prevención del sida y comportamiento de riesgo en áreas de baja incidencia del sida entre los adictos. Holly Hagan, del Departamento de Salud del condado de Tacoma-Pierce, David Goldberg, de la unidad de enfermedades contagiosas del hospital Ruchill de Glasgow, Kerstin Tunving, de la Universidad de Lund, y Alex Wodak, del hospital St. Vincent de Sidney, con sus respectivos colaboradores, nos suministraron datos para la revisión. En cada una de estas ciudades, el VIH se había introducido en la población a través de los drogadictos. Sin embargo, la seroprevalencia entre los consumidores heterosexuales siguió siendo baja (por debajo del 5 por ciento) y estable durante cuatro años, al menos. Aunque las medidas de prevención del sida fueran limitadas en cada uno de esos lugares, en todos se desplegó una actividad comunitaria de búsqueda y acogida, facilitándose el acceso a equipo de inyección estéril a través de intercambios de jeringa y de su venta sin receta en farmacias.

En estas cuatro ciudades no fue necesario eliminar el comportamiento de riesgo para mantener bajos los índices de infección por el VIH. Según indicaron aproximadamente la mitad de los adictos entrevistados, al menos en alguna ocasión se inyectaban con agujas y jeringas que habían sido usadas por otros. La mayoría de las prácticas peligrosas parecían realizarse en grupos pequeños de amigos. Se han descrito también índices bajos y estables de infección por el VIH en Atenas, Toronto, Seattle, Perth y Melburne. Por tanto, la experiencia de las cuatro ciudades estudiadas puede generalizarse a otros lugares donde se acometieron pronto las medidas de prevención.

Además de en las ciudades donde se mantuvieron bajos los índices de infección sídica, otros especialistas han observado la caída de los índices de nuevas infecciones por el VIH y la estabilización de la seroprevalencia del virus en ciudades donde era elevada. Han trabajado en esa línea John K. Watters, de la Universidad de California en San Francisco, Kachit Choopanya, de la Administración Metropolitana de Bangkok, Roeland A. Coutinho, del Servicio Municipal de Salud de Amsterdam, Alfredo Nicolosi, del Consejo de Investigación Nacional en Milán, y nuestro grupo de Nueva York. En esta última ciudad comprobamos que la seroprevalencia del VIH había permanecido estable desde 1983. Estabilización, sin embargo, no implica ausencia de nuevas infecciones. Por el contrario, se produce estabilización cuando hay un equilibrio aproximado entre nuevas infecciones y bajas de drogadictos sidosos, obedecieran éstas al fallecimiento o al abandono de las prácticas de inyección. No es una meta ideal, pero frena la expansión de la epidemia.

Aunque los estudios sugieren la posibilidad de evitar o estabilizar las epidemias entre dichos consumidores de droga, la de invertir una epidemia del VIH bien establecida constituye una tarea de mayor calado. El ejemplo de Amsterdam muestra las dificultades que entraña el luchar contra una epidemia de VIH atrincherada. La seroprevalencia del VIH entre los drogadictos de Amsterdam había alcanzado aproximadamente un 30 por ciento a mediados de la década de los ochenta.

Los responsables de la sanidad pública organizaron rápidamente una campaña ambiciosa de prevención



2. GALERIAS PARA PINCHARSE, que han facilitado la expansión de la epidemia del sida entre quienes se inyectan drogas ilegales. Estos lugares, donde los adictos se inyectan heroína o cocaína, suelen proporcionar las mismas jeringas y agujas a muchos individuos, lo que les coloca en una situación de gravísimo riesgo de transmitir o contraer el VIH, que se propaga con gran eficacia a través de transfusiones sanguíneas, aunque sean minúsculas.

del sida. Se procuró entrar en contacto con el grupo local de adictos y financiarlo para que se implicara en las tareas de prevención, intercambio de jeringas, venta de agujas y jeringas sin receta y tratamiento de la drogodependencia. (Debemos reseñar una crítica de peso contra el programa de prevención del sida de Amsterdam: muchas de la clínicas de mantenimiento con metadona dan dosis de la misma demasiado bajas para aliviar los síntomas del síndrome de abstinencia de la droga, o "mono".)

Según los datos obtenidos por el grupo de Coutinho, los programas de prevención del sida de Amsterdam rebajaron la frecuencia de inyecciones peligrosas y comportaron reducciones pequeñas, aunque significativas, de las actividades sexuales de riesgo. Además, el porcentaje de nuevas infecciones por el VIH entre quienes se inyectan droga disminuyó desde un máximo de ocho por 100 personas-año en situación de riesgo durante principios de la década de los ochenta hasta un porcentaje actual en torno al cuatro por 100 personas-año. Esta caída del porcentaje de nuevas infecciones es llamativa, si bien la incidencia resulta todavía demasiado alta.

Una prevalencia elevada de infección por el VIH entre adictos que se inyectan incrementa el riesgo entre la comunidad de drogodependientes. Una persona cuidadosa podría fácilmente infectarse si, por ejemplo, se olvida y emplea una aguja usada. La actividad sexual se vuelve también más peligrosa, aun cuando el sexo es, de suyo, menos eficaz en la transmisión del VIH que la inyección.

Si resulta posible reducir la adicción mediante programas de tratamiento y disuadir a los individuos de la vía de la inyección, el número de casos de sida podría reducirse incluso en áreas de alta seroprevalencia. La ciudad de Edimburgo ha sido quizá la que más ha progresado en estos dos aspectos. El Proyecto de Prevención de la Droga de la Comunidad funciona allí con médicos generales que administran tratamiento contra la drogodependencia —fundamentalmente en forma de metadona. El grupo de Sally J. Haw, del Hospital Municipal, ha demostrado en una investigación reciente que un gran porcentaje de los adictos que antes se inyectaban drogas están ahora en tratamiento. Muchos otros se mantienen con narcóticos que obtienen de forma ilícita y toman por vía oral.

No se han considerado con suficiente detenimiento las estrategias para impedir que los individuos se inicien en la inyección; la verdad es que ese comienzo constituye quizás el aspecto menos investigado de la difusión del virus entre los drogadictos. Calcular el porcentaje de nuevos consumidores que optan por inyectarse resulta harto difícil. De las escasas pruebas disponibles se desprende una constatación: el conocimiento del sida y su temor no bastan para disuadir a las personas de empezar, o volver, a inyectarse. En un estudio dirigido por los autores, se proporcionó información amplia sobre el sida, incluyendo asesoramiento sobre el proceso de infección y la realización de la prueba, a quienes inhalaban heroína y cocaína; pues bien, a lo largo de un período de seguimiento de nueve meses, se inyectaba drogas una cuarta parte del grupo, casi todos vinculados con alguien que se inyectaba.

Pese a la información acumulada a partir de los estudios que se acaban de describir, así como de otras investigaciones, no se ha generalizado la puesta en marcha de programas de prevención y tratamiento. Tres obstáculos se alzan en el camino. En algunos países en vías de desarrollo, la falta de recursos económicos condiciona las medidas de prevención. No podemos esperar que se les suministren jeringas esterilizadas a los adictos en los estados que no disponen siquiera de equipo estéril para las clínicas y los hospita-

Algunos programas de tratamiento satisfactorios

ASESORAMIENTO Y PRUEBA
NANTES MILAN ESTOCOLMO CONNECTICUT CIUDAD DE NUEVA YORK SAN FRANCISCO OTRAS CIUDADES DE EE.UU.
CAMPAÑAS DE EDUCACION E INFORMACION
CHICAGO NEW JERSEY BRISBANE, AUSTRALIA ALEMANIA PADUA ROMA MEXICO MADRID
AUMENTO DE LA VENTA ILEGAL DE JERINGAS
NUEVA YORK
VENTA LEGAL DE JERINGAS
INNSBRUCK PARIS GLASGOW
COBERTURA PERIODISTICA Y APOYO SOCIAL
NUEVA YORK OTRAS CIUDADES DE EE.UU.
TRATAMIENTO CON METADONA
ITALIA AMSTERDAM ESTOCOLMO CIUDAD DE NUEVA YORK FILADELFIA BALTIMORE SAN FRANCISCO
DISTRIBUCION DE DESINFECTANTE
CHICAGO SACRAMENTO SAN FRANCISCO OTRAS CIUDADES DE EE.UU.
MEJORA DEL TRATAMIENTO
NEW JERSEY NUEVA YORK OTRAS CIUDADES DE EE.UU.
INTERCAMBIO DE JERINGAS
AUSTRALIA AMSTERDAM LUND LONDRES SAN FRANCISCO TACOMA OTRAS CIUDADES DE EE.UU.



3. EL AUTOBUS DE LA METADONA y los trabajadores sanitarios de Amsterdam ponen el tratamiento al alcance de los consumidores de droga, reduciendo así el consumo de drogas ilegales y, por consiguiente, el riesgo de propagación del VIH mediante la inyección.

les. Se ha intentado recurrir a la lejía para desinfectar las agujas, pero no se ha corroborado que produzca efecto protector alguno. Ello podría deberse a que la desinfección de agujas y jeringas necesita un tiempo de contacto bastante largo, unos dos enjuagues, de 30 segundos o más cada uno.

Existen regiones, asimismo, que tendrían que tener un mayor conocimiento de los peligros que acarrea la inyección y ciertos comportamientos sexuales, para prevenir la transmisión. Los programas actuales parecen adecuados para controlar la transmisión del sida en zonas de baja seroprevalencia, pero quizá se requiera, para invertir la situación, una nueva hornada de planes de reducción del riesgo en los sitios de alta seroprevalencia. Entre otros componentes, estos servicios deberían garantizar el acceso a agujas estériles, desaconsejar el uso compartido de agujas, ofrecer tratamiento contra la drogodependencia e impedir la iniciación en las prácticas de inyección. Se ha sugerido también fomentar el uso de formas no inyectables como una vía de evitar la transmisión del VIH. Pero no se han diseñado las medidas para hacer viable esa idea.

El obstáculo principal con que se encuentra el afán por frenar la difusión del virus entre los adictos no reside tanto en la falta de recursos o la ignorancia cuanto en la ausencia de voluntad política para aprovechar la información disponible. Contamos con pruebas razonables de la eficacia de muchas estrategias de prevención, pero se hallan cargadas de connotaciones políticas. En Europa, los programas que ofrecen tratamiento de mantenimiento tienen muchos detractores, lo que dificulta su aplicación. En Amsterdam, aun cuando se permite el mantenimiento con metadona, se proporcionan dosis demasiado bajas para ser efectivas y durante períodos muy cortos. En otros lugares, un consumidor debe estar ya infectado por el VIH antes de que se le recete metadona.

En EE.UU., y en menor medida en Suecia, el intercambio de jeringas y la venta sin receta de equipo de agujas esterilizadas sigue siendo una práctica muy controvertida. Quienes se oponen a la legalización del acceso directo al armamentario defienden que con ello se fomentaría la inyección de droga; sería, sostienen, una dejación de responsabilidad o tolerancia oficial de esas conductas. Pero ninguna investigación avala ese razonamiento. En EE.UU. el debate sobre intercambio de jeringas se ha complicado por su tendencia histórica a estigmatizar a ciertos grupos étnicos por consumir drogas, trufando de hostilidad racial el debate sobre la prevención.

Parte de la oposición al intercambio de jeringas, a su expendición sin receta y a otros programas de inyección menos peligrosos prescinde de los estudios sociológicos. En Suecia, el Parlamento rechazó los resultados de un trabajo de evaluación que respaldaba la solicitud de extender a

toda la nación los planes de intercambio de jeringas. En EE.UU. la legislación federal prohibía la financiación de servicios de intercambio similares, a menos que el inspector general de sanidad demostrara la inocuidad y eficacia de tales prácticas. Pero hasta 1992 el gobierno federal se negó a reservar fondos para comprobar la inocuidad y eficacia de los programas financiados por entidades locales.

Estas actitudes contraproducentes están comenzando a cambiar. El debate sobre métodos para prevenir el sida entre los drogadictos ha llevado a un replanteamiento general sobre la mejor forma de regular el uso de drogas legales e ilegales. A partir del trabajo realizado en los Países Bajos, el Reino Unido y Australia ha cobrado cuerpo el planteamiento de "reducción del daño"; aunque éste reconoce pragmáticamente las dificultades de erradicar por completo el consumo de fármacos psicoactivos, pone el énfasis en las posibilidades de atajar el riesgo individual y social ligado al consumo de drogas.

En los programas de reducción del daño se considera posible frenar la infección por el VIH entre los adictos —lo mismo que se minan las posibilidades de accidentes automovilísticos entre quienes siguen bebiendo alcohol. Los programas de reducción del daño son compatibles con la investigación científica sobre el comportamiento consecutivo al consumo de drogas, porque esta información resulta fundamental para determinar qué políticas sociales y de salud pública ejercen efectos reales.

La infección del sida entre adictos que se inyectan, sus compañeros sexuales y sus hijos se ha convertido en un problema de salud pública. Es muy probable que la situación siga empeorando con la expansión del consumo de drogas y la difusión del sida por un número creciente de países subdesarrollados. Las estrategias de reducción del daño ofrecen una valiosa oportunidad para prevenir la epidemia en lugares de baja prevalencia del VIH y en zonas donde se dispone de los recursos adecuados para la búsqueda y acogida comunitarias activas, así como para el acceso a jeringas estériles. Pero atajar la transmisión del VIH entre los consumidores de droga requiere una filosofía política que permita a los responsables públicos poner en práctica los descubrimientos de las investigaciones. Hasta ahora, y con un gran coste social, muchos gobiernos han obviado esa lección.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIV-1 INFECTION AMONG INTRAVENOUS DRUG USERS IN MANHATTAN, NEY YORK CITY, FROM 1977 THROUGH 1987. D. C. Des Jarlais y cols. en *Journal of the American Medical Association*, volumen 261, número 7, páginas 1008-1012; 17 de febrero de 1989.

HIV AMONG DRUG INJECTORS: THE EPIDEMIC AND THE RESPONSE. S. R. Friedman y D. C. Des Jarlais en *AIDS Care*, volumen 3, número 3, páginas 239-250; septiembre de 1991.

INTERNATIONAL EPIDEMIOLOGY OF HIV AND AIDS AMONG INJECTING DRUG USERS. D. C. Des Jarlais, S. R. Friedman, K. Choopanya, S. Vanichseni y T. P. Ward en *AIDS*, volumen 6, número 10, páginas 1053-1068; 1992.

HARM REDUCTION: A PUBLIC HEALTH RESPONSE TO THE AIDS EPIDEMIC AMONG INJECTING DRUG USERS. D. C. Des Jarlais, S. R. Friedman y T. P. Ward en *Annual Review of Public Health*, volumen 14; 1993.

Aves del terror sudamericanas

Grandes y veloces, fueron los carnívoros dominantes del continente durante millones de años, hasta que sus competidores los abocaron a la extinción

Larry G. Marshall

Es un día de verano en las pampas del corazón de Argentina, hace unos cinco millones de años. Un rebaño de pequeños mamíferos, parecen caballos aunque no lo son, ramonea bajo un sol de justicia. Ninguno advierte que, a 50 metros, oculto entre la hierba, algo acecha. Su cuerpo, recubierto de plumas, es compacto; un cuello largo y poderoso sostiene su cabeza desproporcionadamente grande. Tiene los ojos, situados a ambos lados de la cabeza, clavados en el rebaño. Mueve la testa de un lado a otro en sacudidas cortas y rápidas. Fija así la posición de la presa sin necesidad de recurrir a la visión estereoscópica. Baja la cabeza hasta rozar la hierba. Avanza unos 20 metros, levanta de nuevo la mirada y sigue al acecho. Dispuesto al ataque, baja la cabeza y refriega el pico contra una piedra, aguzando sus bordes cortantes.

Eriza las plumas y salta. Se lanza hacia el rebaño propulsado por dos patas musculosas y largas. En pocos segundos alcanza 70 kilómetros por hora. Extiende sus alas cortas, inútiles para el vuelo, que le ayudan a mantener el equilibrio y maniobrar.

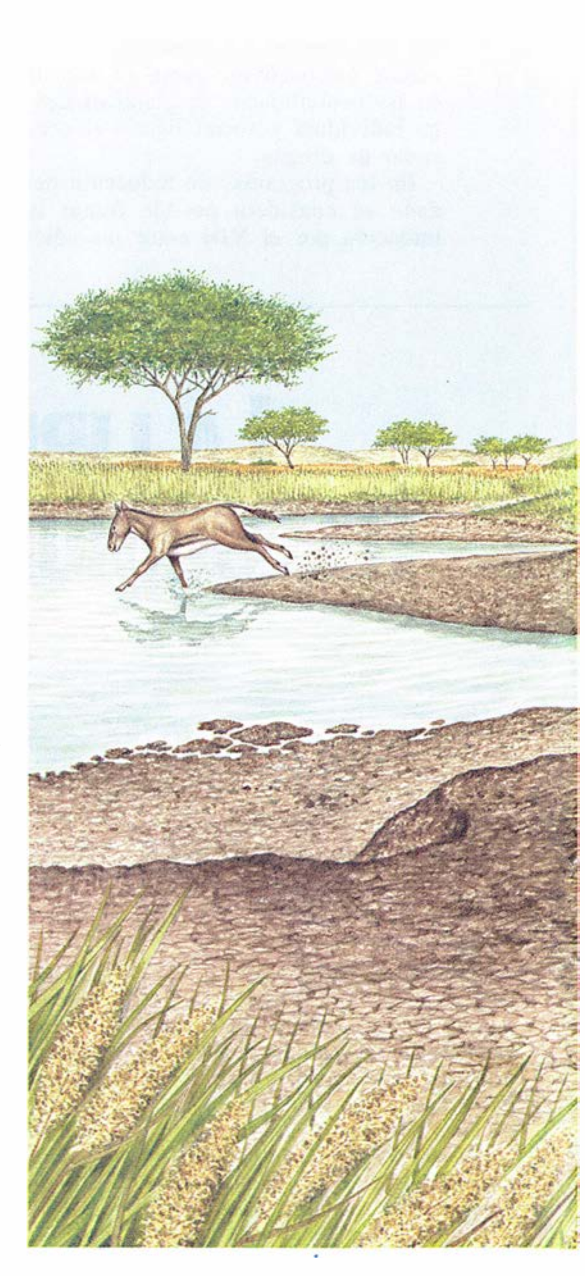
El rebaño huye despavorido ante el ataque del ave terrorífica. El depredador distingue un viejo macho que se rezaga; por mucho que éste corra el ave no tardará en darle alcance. Con un golpe de refilón de su poderosa pata izquierda desequilibra a la presa. La agarra con el pico y, moviendo la cabeza, la tunde contra el suelo hasta dejarla aturdida. Puede tragarse entero el cuerpo fláccido. Le resulta fácil, dado el tamaño de la cabeza (un metro) y la anchura de la boca (medio metro). Después, satisfecho y ahíto, vuelve a su nido de ramas, en el prado cercano, donde incuba dos huevos como pelotas de baloncesto.

LARRY G. MARSHALL, investigador del Instituto de los Orígenes Humanos de Berkeley, se doctoró en paleontología en 1976 por la Universidad de California. Desde 1974 estudia la historia evolutiva de los mamíferos terrestres sudamericanos; ha participado en 22 expediciones a Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, México y Perú.

Acabamos de conocer a un representante de las aves del terror, el grupo más formidable de aves carnívoras e incapaces de volar que haya vivido jamás. Extintas en la actualidad, antaño fueron en tierra lo que los tiburones en el mar: máquinas de destrucción y pavorosos ingenios devoradores. En su larga existencia, que duró desde hace 62 hasta hace unos 2,5 millones de años, se convirtieron en los carnívoros dominantes de Sudamérica.

Las aves del terror pertenecen al grupo de los fororracoides. En 1887, Florentino Ameghino, paleontólogo argentino, describió el primer fósil, al que denominó *Phorusrhacos longissimus*. El fósil procedía de la formación Santa Cruz, en la Patagonia argentina, formación que tiene una antigüedad de unos 17 millones de años.

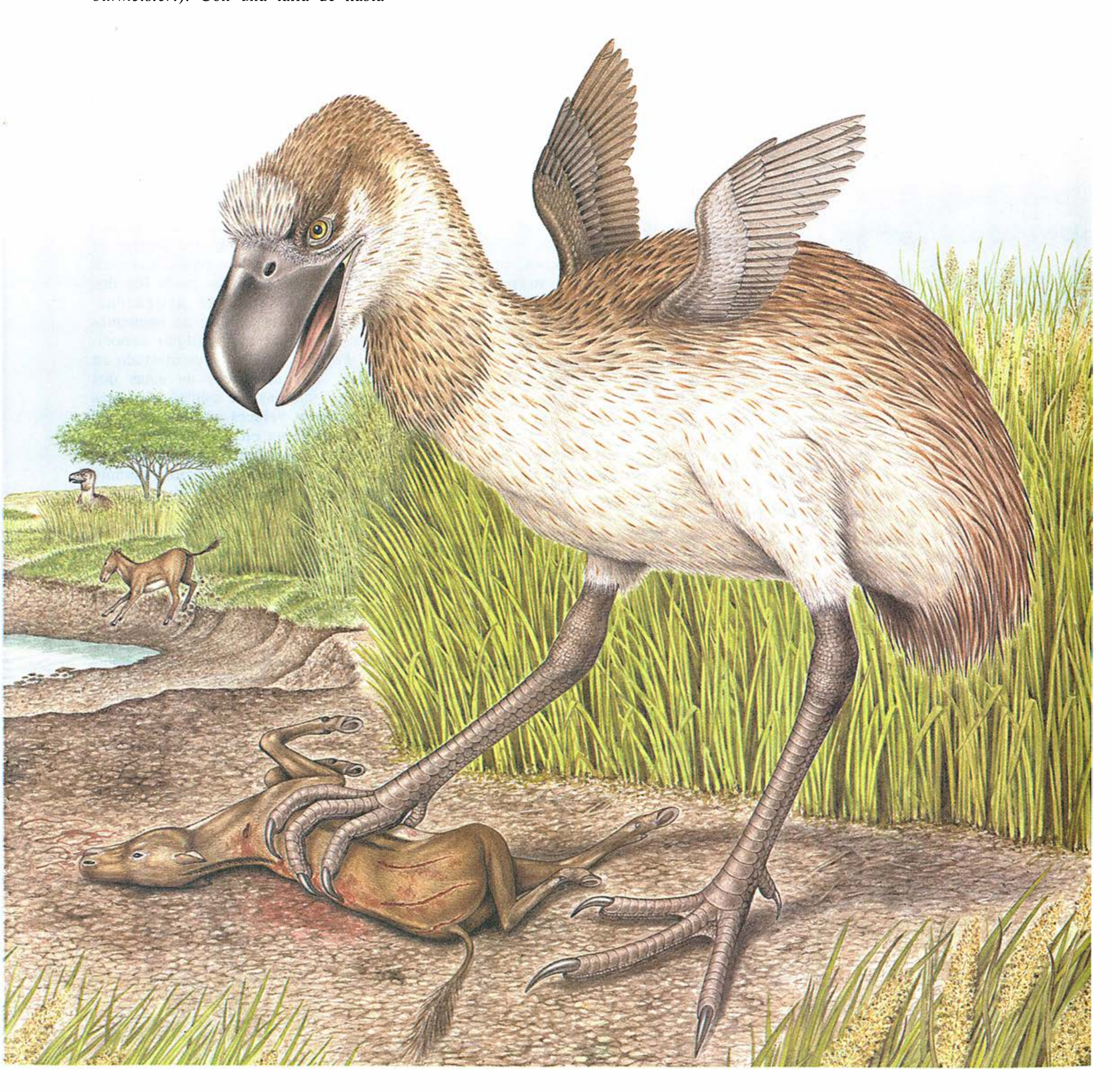
Ameghino y otros reconstruyeron la morfología de las aves a partir de sus restos fósiles. También describieron sus hábitos, según los conocidos de animales que podrían ser los parientes actuales de los extinguidos. Inicialmente, algunos vieron en las costumbres carnívoras de los fororracoides una prueba de su parentesco con las águilas y halcones modernos. Pero no todos estaban de acuerdo, y el problema fue objeto de debate hasta que, en 1899, lo zanjó Charles W. Andrews, del Museo Británico. Para Andrews, de todos los grupos actuales y extinguidos, los fororracoides guardaban una relación de parentesco más estrecha con los sariaes sudamericanos; éstos pueden considerarse los antepasados estructurales



de los fororracoides. Los sariaes, sariamas o chuñas viven en las praderas de Argentina septentrional, Bolivia oriental, Paraguay y Brasil central y oriental. Sariaes y fororracoides se incluyen todos en el orden Gruiformes, que abarca grullas, rascones y sus afines.

Existen dos especies actuales de sariaes, la chuña crestada o patirroja *(Cariama cristata)* y la chuña patinegra o de Burmeister *(Chunga burmeisteri)*. Con una talla de hasta 0,7 metros, son de cuerpo grácil y de patas y cuello largos. En relación con su tamaño corporal, sus alas son pequeñas; sólo emprenden vuelos cortos si se ven obligadas. En cambio, estos animales, excelentes corredores, alcanzan más de 60 kilómetros por hora. Los sariaes anidan sobre arbustos, a una altura de cuatro a seis metros del suelo. Las crías, dos por lo general, maduran en un par de semanas; abandonan el nido para vivir y cazar en las praderas vecinas. Como la mayoría

1. AVE DEL TERROR a punto de comerse un pequeño animal con aspecto de caballo (*Brachytherium*), capturado en veloz carrera y al que aturdió golpeándolo contra el suelo mientras lo sujetaba con el pico. Esta ave (*Andalgalornis*), de la talla de una persona, era un fororracoide, carnívoro terrestre extinto que dominó en Sudamérica hace unos dos millones de años.



de los carnívoros, los sariaes son territoriales. Su penetrante ululeo, dicen, infunde miedo.

Al igual que los fororracoides, los sariaes son carnívoros. Se alimentan de insectos, reptiles, micromamíferos y aves. En condiciones favorables, atacan animales mayores. Agarran su presa con el pico y la golpean contra el suelo hasta que, ya fláccida, pueden tragarla entera. Esa misma estrategia alimentaria la encontramos hoy en el correcaminos *(Geococcyx californianus)*, de los Estados Unidos sudoccidentales, y el serpentario o secretario *(Sagittarius serpentarius)*, de Africa.

Los sariaes pertenecen a la familia Cariámidos, confinada a Sudamérica, donde se han encontrado unas 10 especies fósiles, siendo la más antigua, localizada en Brasil, del Paleoceno medio, hace unos 62 millones de años. Los parientes de este grupo están representados por dos familias fósiles: los Batornítidos, que aparecen en yacimientos de 40 a 20 millones de años en Norteamérica, y los Idiornítidos, presentes en ciertas formaciones rocosas europeas de 40 a 30 millones de años de antigüedad. Algunos paleontólogos creen que, por su estrecha relación, estas familias deberían integrarse en los Cariámidos.

La mayoría de las aves del terror, mucho mayores que sus parientes actuales, medían de uno a tres metros de altura. Los miembros más antiguos del grupo son tan especializados como los últimos, prueba de un origen anterior a su primera aparición en el registro fósil.

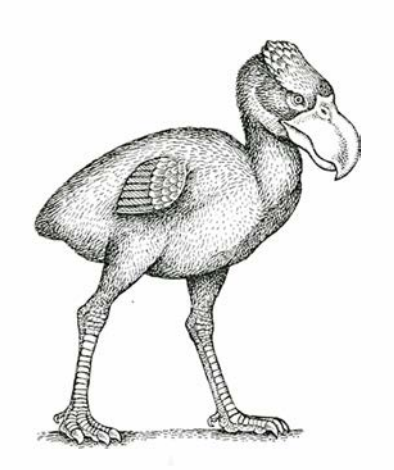
Se han reconocido una docena de géneros y 25 especies de aves del terror, pero no acaba de dilucidarse su respectiva relación de parentesco. Fueron clasificadas en 1960 por Bryan Patterson, del Museo de Zoología Comparada de la Universidad de Harvard, y por Jorge L. Kraglievich, del Museo Municipal de Ciencias Naturales y Tradicional de Mar del Plata.

Patterson y Kraglievich ordenaron las aves del terror en tres familias comparándolas con las familias de mamíferos: animales de tamaño medio, grande y gigantesco. Otros, apoyados en el período de mayor diversidad, transcurrido hace entre cinco y tres millones de años, reconocen dos familias, de tamaño medio y gigantesco, así como dos subfamilias. Y otros autores, por fin, acumulan todos los fósiles en una misma familia.

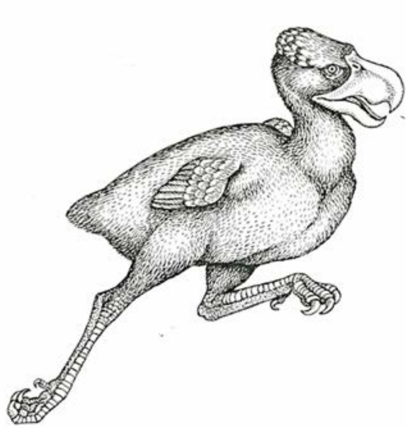
En el sistema de tres familias, las formas gigantes integran la familia Brontornítidos, cuyos fósiles aparecen en yacimientos de 27 a 17 millones de años de antigüedad. Eran aves de pico enorme, estructura pesada y voluminosa, y con los huesos de las patas bastante cortos. A tenor de esos datos correrían más lentas que las otras dos familias.

Los miembros de la segunda familia, los Fororrácidos, alcanzaban entre dos y tres metros de altura. Se han encontrado fósiles en rocas de 27 a tres millones de años de antigüedad. La tercera familia, los Psiloptéridos, agrupa individuos pequeños, de no más de un metro de altura. Los fósiles conocidos van desde los 62 millones hasta los dos millones de años de antigüedad. Dentro de esta familia se encuentra el fororracoide más antiguo conocido, *Paleopsilopterus*, desenterrado en Brasil. Los miembros de estas dos últimas familias, de complexión más ligera, eran veloces en su carrera. Y se convirtieron en los carnívoros corredores dominantes de su tiempo, conservando esta condición durante millones de años.

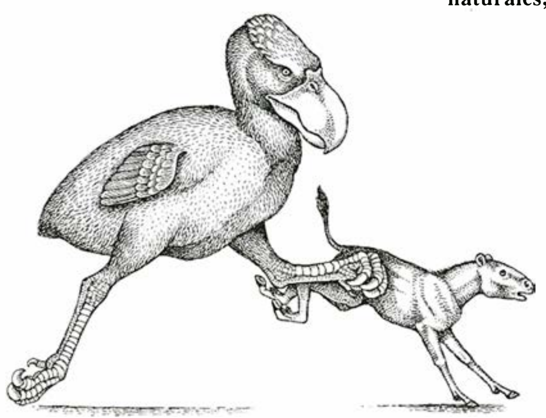
La diversidad de tamaños entre los fororracoides induce a pensar que los adultos podían depredar sobre animales de diferente talla, de roedores a grandes herbívoros. Aunque al-



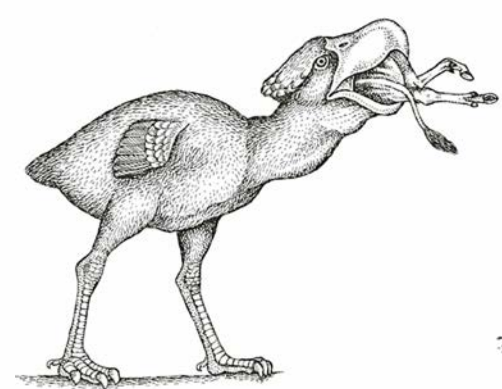
AL ACECHO



EN PLENA CARRERA



ATURDIENDO A LA PRESA



TRAGANDOLA ENTERA



AHITA

2. TECNICA DE CAZA DE UN AVE DEL TERROR. Se caracterizaba por dos notas distintivas: era selectiva y mortal. Este habitante de las pampas sudamericanas permanecía escondido entre la hierba hasta acercarse a su presa. Entonces se abalanzaba velozmente sobre su víctima con un golpe de refilón de su pata izquierda, poderosísima, la desequilibraba; la agarraba luego con el pico y la dejaba fláccida golpeándola contra el suelo. Solía comerse a su presa entera. Libre de depredadores naturales, el ave del terror podía comer fuera del nido.




3. PARIENTES ACTUALES de los fororracoides. Son los sariaes, sariamas o chuñas de Sudamérica: el sariá patirrojo (*Cariama cristata*) y la chuña patinegra o de Burmeister (*Chunga burmeisteri*). Los sariaes, de 0,7 metros de talla, son de cuerpo grácil y de patas y cuello largos; cazan de manera muy parecida a como lo hacían las aves del terror. Anidan en árboles bajos. Las aves del terror anidaban sobre el suelo. Las crías de los sariaes, dos por lo general, maduran en un par de semanas.

gunos herbívoros adultos igualaban el tamaño de ciertos fororracoides, las aves podían haber hecho presa fácil sobre las crías. Los fororracoides recién salidos del nido, menores que éstas, probablemente cazaran roedores y otros microvertebrados, que es lo que vemos hoy con los sariaes, sus parientes vivos.

Durante buena parte de la edad de los mamíferos, los últimos 66 millones de años, los fororracoides constituyeron los carnívoros más veloces de Sudamérica. Para ello, hubieron de sacrificar su capacidad de vuelo. La extinción de los celurosaurios, pequeños dinosaurios bípedos que les antecedieron, les abrió el camino para su predominio entre los carnívoros, en una transición de relevo evolutivo.

La morfología externa de las aves del terror guardaba un estrecho parecido con la de los celurosaurios: cuerpo esbelto y alargado, patas posteriores largas y potentes, cuello largo también y cabeza grande. Muchos celurosaurios tenían las extremidades anteriores reducidas, lo que indica que capturaban, mataban y manipulaban la presa con las patas posteriores y la boca, igual que los fororracoides. Si los celurosaurios empleaban su larga cola como contrapeso en la carrera, los fororracoides desplegaban sus alas reducidas para conseguir el equilibrio. Así, con diferentes estrategias y apéndices perseguían idéntico propósito funcional.

Las aves del terror y sus parientes medraron también fuera de América del Sur. En su distribución se esconde la clave de la historia biogeográfica que explica el ocaso de su dominio carnívoro en Sudamérica.

En rocas de 55 a 45 millones de años de antigüedad en Norteamérica, Europa y Asia, las grandes aves carnívoras están representadas por la familia Diatrimátidos. Según Herculano M. F. Alvarenga, paleontólogo brasileño, dicha familia desarrolló características similares a las de los fororracoides. Los Diatrimátidos alcanzaban hasta dos metros de altura; poseían cráneo voluminoso y garras poderosas. Sin embargo, sus patas eran más cortas y robustas que las de los fororracoides, lo que nos habla de movimientos más metódicos y pesados, que recuerdan los de los Brontornítidos.

Un presumible fororracoide, *Ameghinornis*, procede de fosforitas del Quercy, en Francia; esas rocas se remontan unos 38 o 35 millones de años atrás. *Ameghinornis* tenía el tamaño de un sariá actual, de lo que se desprende que realizaba breves vuelos.

En el Antártico se han desenterrado fósiles similares. Se conocen dos huellas distintas de pies, de 18 centímetros de longitud, en rocas de unos 55 millones de años, en la península Fildes de la isla del Rey Jorge, en la Antártida occidental. El ave, grande, ancha y longilínea, y con tres dedos, pudo ser un fororracoide o una ratite (un avestruz, un avestruz americano o uno de sus parientes).

En rocas de 40 millones de años de antigüedad de la formación La Meseta, en la isla Seymour, en la región austral de la península Antártica, se halló la parte anterior del pico de un fororracoide, cuyas proporciones nos hablan de un ejemplar de más de dos metros de altura.

Titanis walleri, con sus más de tres metros de altura, quedó fosilizado en Florida, en rocas de entre 2,5 y 1,5 millones de años de antigüedad. Este registro, el más reciente en términos geológicos de los encontrados hasta la fecha, representa la última ave del terror conocida.

A partir de dos premisas —los fororracoides necesitaban rutas terrestres para su dispersión y el registro fósil refleja con precisión su presencia en el espacio y el tiempo— podemos establecer sus pautas de distribución. Hay pruebas biológicas y geológicas de la unión de Norteamérica y Sudamérica mediante un puente continental emergido, que concatenaba las Antillas, hace 62 millones de años. Ese pasillo propició la dispersión de varios grupos de vertebrados terrestres; entre ellos, un sariá y un fororracoide, tal vez un psilopterido, que se desplazaron hacia el norte.

Otro corredor continental unía, hace de 45 a 55 millones de años, Norteamérica y Europa. Por esta ruta, que incluía la actual isla Ellesmere, pudieron moverse las aves del terror. El grupo *Ameghinornis*, cuyos restos se exhumaron en Francia, quizá siguió esa vía. Si bien la hipótesis presupone la existencia un grupo fororracoide de dicha edad en Nor-

teamérica, donde aún no se han encontrado fósiles contemporáneos.

Hace entre 45 y 70 millones de años, una masa de tierra unía el extremo austral de Sudamérica con la Antártida occidental. Lo prueba la presencia de marsupiales, un armadillo y el haya austral, en los mismos yacimientos pétreos que el fororracoide de la isla Seymour. En conjunto, el puente continental y el clima frío y templado de la época explican la presencia de aves del terror en la Antártida occidental hace 40 millones de años.

Cuando las conexiones continentales que unían Sudamérica con Norteamérica y la Antártida se cortaron, Sudamérica se convirtió en un continente insular hasta que emergió el puente de Panamá, por el levantamiento tectónico continuo de los Andes, hace 2,5 millones de años, y su probable asociación con un descenso mundial del nivel del mar de hasta 50 metros, provocado por la formación de los casquetes de hielo polares. La conexión definitiva incluía el sur de Panamá y el norte de Colombia actuales.

Por aquella época, un enfriamiento general del clima mermó los hábitats tropicales y propició la extensión de las sabanas. En el puente continental prosperaron ambientes de pradera. Pasado un tiempo, hubo un corredor continuo de sabanas desde Argentina a Florida. Estas condiciones favorecieron el Gran Intercambio Americano, un proceso de dispersión recíproca de fauna terrestre y el ejemplo mejor documentado en el registro fósil de la mezcla de dos biotas continentales separadas durante largo tiempo. Las aves del terror participaron de ese intercambio. Una estirpe de fororracoides sobrevivió más allá de hace 2,5 millones de años en Sudamérica, y las aves se dispersaron hacia el norte para dar origen a *Titanis* en Florida.

Con ese marco de referencia podemos empezar a entender por qué aves imponentes e incapaces de volar se instalaron en la cúspide de la pirámide alimentaria y por qué fueron desalojadas de ese puesto. La llave está en el desarrollo histórico de la fauna terrestre de América del Sur.

Recuérdese que, durante la mayor parte de los últimos 66 millones de años, América del Sur fue un continente insular, como la actual Australia. Los marsupiales ocuparon en Sudamérica el lugar de los mamíferos carnívoros terrestres, mientras que los grandes herbívoros detentaron el de los placentarios. Esta combinación de marsupiales y placentarios era única entre las faunas continentales: ambos cometidos los desempeñaban, en Australia, los marsupiales, y los placentarios en Norteamérica, Europa y Asia.

Marsupiales del grupo sudamericano borhienoides evolucionaron y llegaron a ocupar el lugar de los cánidos y félidos placentarios en los continentes septentrionales. Sus miembros, de aspecto perruno y talla variable (del tamaño de una mofeta al de un oso), se clasificaron en tres familias. La de los Tilacosmílidos se parecía a los tigres de dientes de sable placentarios. Todos tenían patas más bien cortas; ninguno mostraba particular adaptación para la carrera. Estos eran los mamíferos que ocupaban el nicho carnívoro sudamericano.

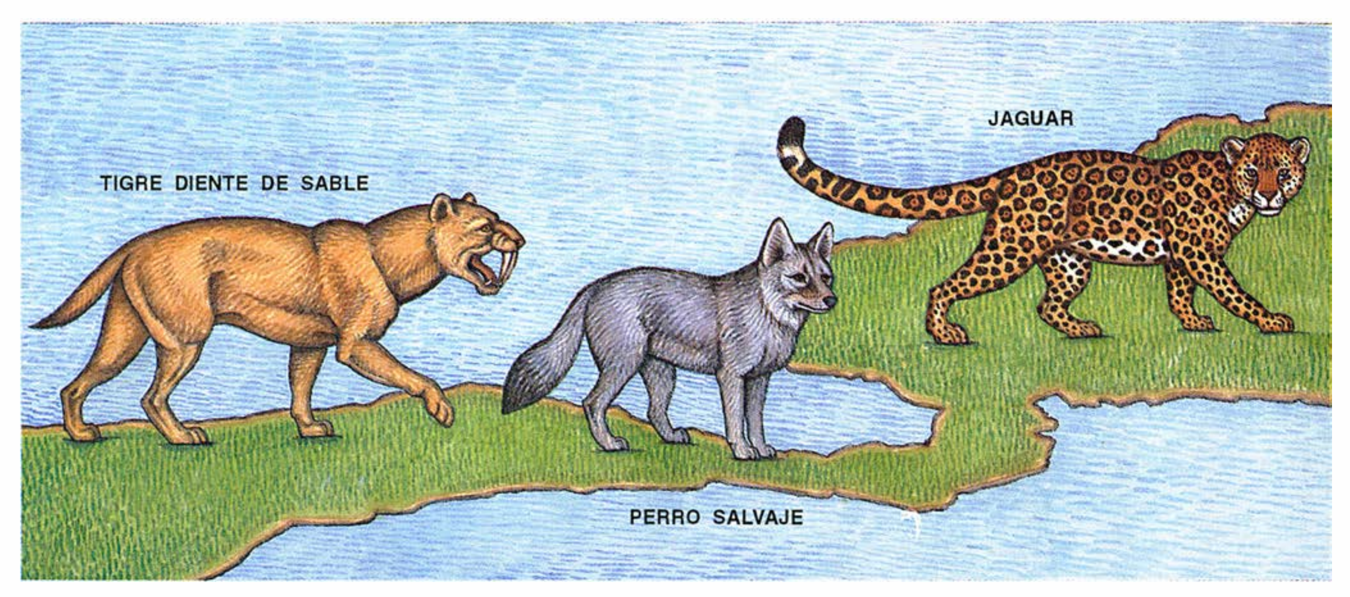
Grandes cocodrilos terrestres o semiterrestres de la familia Sebécidos participaban también del nicho de los carnívoros sudamericanos. Poseían un cráneo elevado y tenían las patas en situación más ventral que en los cocodrilos acuáticos y de cráneo plano. Sus dientes, comprimidos lateralmente y con bordes cortantes aserrados, recordaban los de los dinosaurios carnívoros. Las aves del terror eran el otro grupo carnívoro.

Borhienoides, cocodrilos sebécidos y fororracoides compartieron, en varias épocas y de manera desigual, el nicho de los carnívoros terrestres de Sudamérica, hace entre 66 y 2,5 millones de años.

4. DECADENCIA DE LAS AVES DEL TERROR, iniciada cuando se formó el puente continental panameño (*rojo*) entre América del Norte y América del Sur, hace unos 2,5 millones de años. Por esta vía llegaron a Sudamérica los mamíferos norteamericanos depredadores de las aves del terror. En ambos continentes se han encontrado fósiles de animales que migraron hacia el sur o hacia el norte (*verde*). La mayoría de los fósiles de aves del terror (*naranja*) se han desenterrado en Sudamérica. En la Antártida se encontró el extremo de una mandíbula (*abajo*).

El registro fósil ilustra una sostenida merma del tamaño y la diversidad de los borhienoides caniformes, junto al aumento en talla y variedad de los fororracoides, hace entre 27 y 2,5 millones de años. En consecuencia, pues, hace unos cinco millones de años los fororracoides habían sustituido por entero a los grandes carnívoros borhienoides en las sabanas sudamericanas; los borhienoides más pequeños, que no competían con las aves del terror, se extinguieron antes que emergiera el puente panameño.

La transición de sustitución de los marsipuales descrita



5. DESAPARICION DE LAS AVES DEL TERROR por culpa de cánidos y félidos, que, como otras muchas especies procedentes del Norte, cruzaron el puente continental panameño hacia Sudamérica. Una mayor inteligencia, más velocidad y agilidad, o la capacidad de depredar sobre los huevos y las crías de las aves del terror explicarían el declive de los fororracoides ante estos migradores septentrionales. Sólo una estirpe sobrevivió aún más de 2,5 millones de años, pero al final sucumbió.

constituye otro relevo en la historia evolutiva de los fororracoides. Desconocemos la razón de su éxito, pero sin duda les confirió ventaja su capacidad de carrera para capturar presas en los ambientes de sabana que empezaron a ser prominentes hace unos 27 millones de años.

Procedentes de Norteamérica, carnívoros placentarios de las familias Cánidos y Félidos aprovecharon el puente continental panameño para llegar a Sudamérica. La única competencia que encontraron fue la de los fororracoides; los grandes carnívoros marsupiales sudamericanos se habían extinguido. En esta batalla por el predominio, perdieron las aves.

Los fororracoides habían, pues, alcanzado su apogeo en tamaño y diversidad justo antes del intercambio. Pero la competencia con cánidos y félidos marcó su declive. Sólo una estirpe sobrevivió más de 2,5 millones de años en América del Sur: la que llegó a Florida, representada por *Titanis*, único animal carnívoro sudamericano que se dispersó hacia el norte. Pero no logró coexistir, por largo tiempo, con carnívoros placentarios evolucionados. El porqué de su fracaso es hoy un enigma. Quizá la implantación de los carnívoros placentarios residentes impidió que los fororracoides encontraran en Norteamérica un nicho permanente.

El destino de los parientes de los fororracoides en Norteamérica y Europa, hace entre 55 y 45 millones de años, va también ligado a la aparición de carnívoros placentarios avanzados. Los creodontos ocupaban, en los continentes septentrionales, el sitio de los grandes mamíferos carnívoros, durante esa época. Este grupo primitivo de placentarios se parecía a los borhienoides marsupiales; poco aptos para la carrera, poseían un cerebro pequeño. Los parientes de los fororracoides en estos continentes desaparecieron con el auge de los mamíferos placentarios avanzados, hace 45 millones de años.

Por lo que se conoce, las aves del terror prosperaron en ausencia de carnívoros placentarios avanzados, que resultaron ser mejores competidores. Los marsupiales borhienoides y los placentarios creodontos eran, en esencia y en comparación con las aves del terror, animales de segunda categoría.

Pero este razonamiento, aunque plausible, carece de suficiente respaldo observacional. No hay un factor claro capaz de ofrecer explicación satisfactoria de la extinción de ningún grupo fósil. El declive, en dos ocasiones, de las aves del terror se correlaciona con la presencia de carnívoros placentarios avanzados. ¿Eran éstos más inteligentes que aquéllas? El poseer cuatro patas, ¿les dio ventaja en velocidad o agilidad sobre las aves bípedas? ¿Comían los placentarios los huevos de los fororracoides, depositados en nidos a ras del suelo? ¿Hacían presa sobre los pollos?

Esa página de la historia de la vida invita a preguntarnos qué pasaría si, de golpe, se extinguieran los grandes mamíferos carnívoros de América del Sur. ¿Originarían los sariaes un grupo de aves carnívoras, gigantes y dueñas de la sabana, como los fororracoides y sus parientes extintos?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SISTEMÁTICA Y NOMENCLATURA DE LAS AVES FORORRACOIDEAS DEL PLIOCENO ARGENTINO. Bryan Patterson y Jorge L. Kraglievich en *Publicaciones del Museo Municipal de Ciencias Naturales y Tradicional del Mar del Plata*, volumen 1, número 1, páginas 1-51; 15 de julio de 1960.

A GIANT FLIGHTLESS BIRD FROM THE PLEISTOCENE OF FLORIDA. Pierce Brodkorb en *The Auk*, volumen 80, número 2, páginas 111-115; abril de 1963.

THE TERROR BIRD. Larry G. Marshall en *Field Museum of Natural History Bulletin*, volumen 49, número 9, páginas 6-15, octubre de 1978.

LES OISEAUX FOSSILES DES PHOSPHORITES DU QUERCY (ÉOCÈNE SUPÉRIEUR À OLIGOCÈNE SUPÉRIEUR): IMPLICATIONS PALÉOBIOGÉOGRAPHIQUES. Cécile Mourer-Chauviré en *Geobios, Mémoire Special*, número 6, páginas 413-426; 1982.

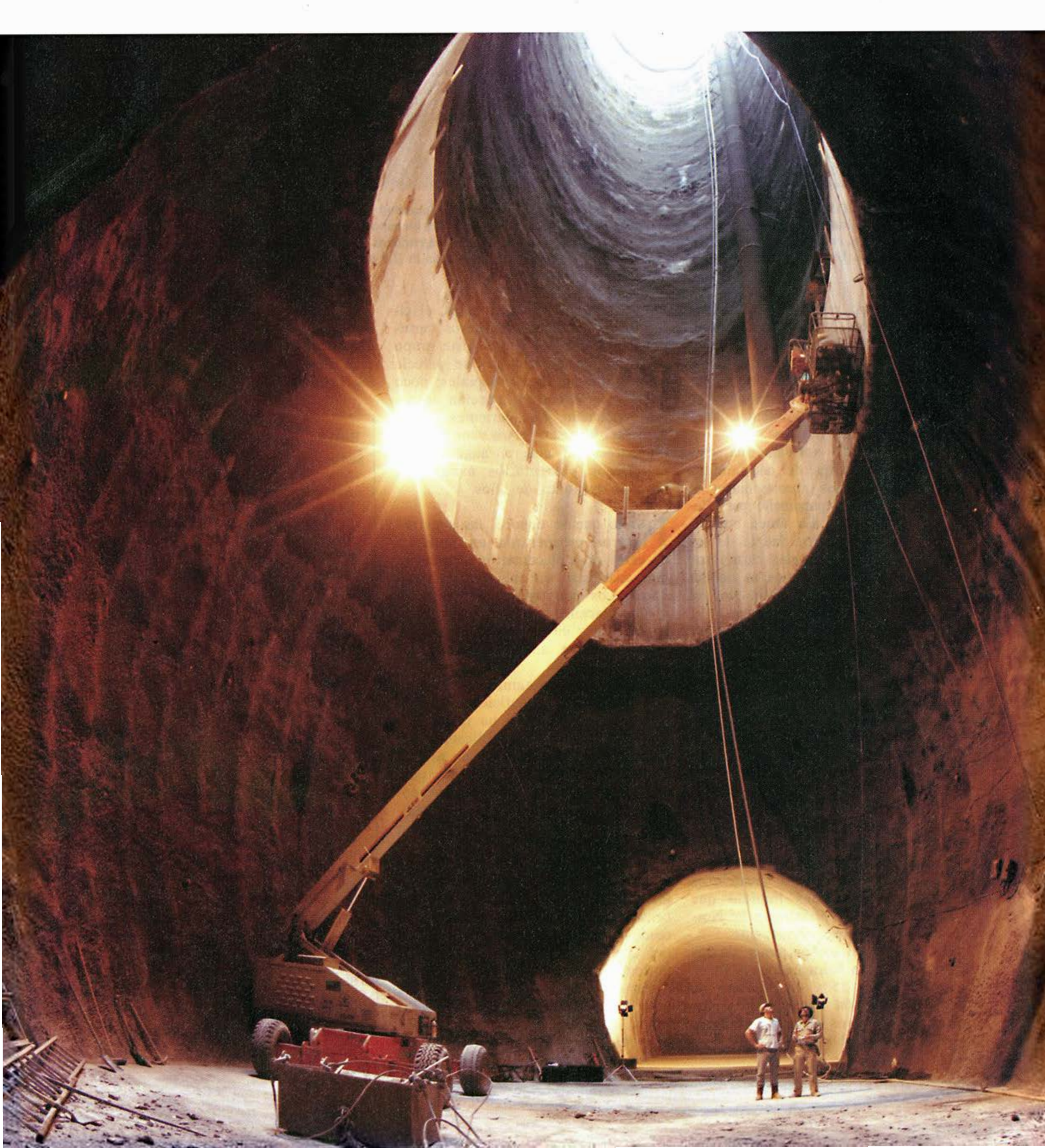
A GIGANTIC PHORORHACOID(?) BIRD FROM ANTARCTICA. Judd A. Case, Michael O. Woodburne y Dan S. Chaney en *Journal of Paleontology*, volumen 61, número 6, páginas 1280-1284; noviembre de 1987.

LAND MAMMALS AND THE GREAT AMERICAN INTERCHANGE. Larry G. Marshall en *American Scientist*, volumen 76, número 4, páginas 380-388; julio/agosto de 1988.

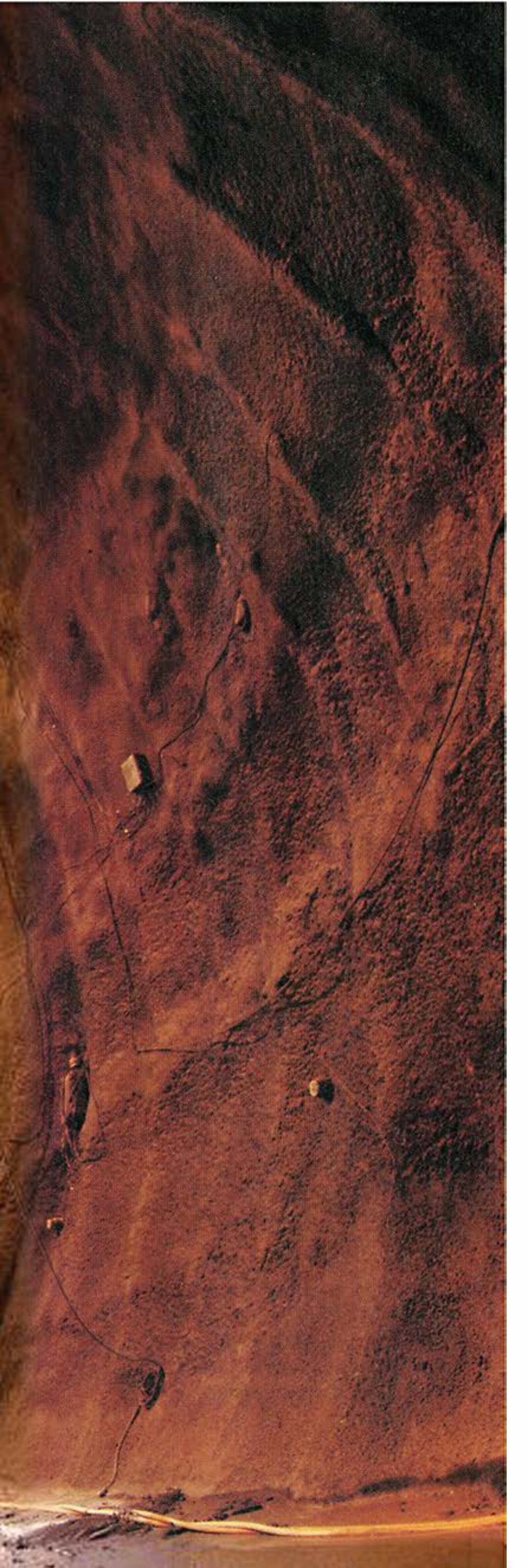
THE TERROR BIRD STILL SCREAMS. Kent H. Redford y Pamela Shaw en *International Wildlife*, volumen 19, número 3, páginas 14-16; mayo/junio de 1989.

La metafísica de las partículas

John Horgan



Tras el naufragio del supercolisionador superconductor, los físicos están divididos acerca de cómo deberían, o si deberían siquiera, seguir buscando una teoría unificada de la naturaleza



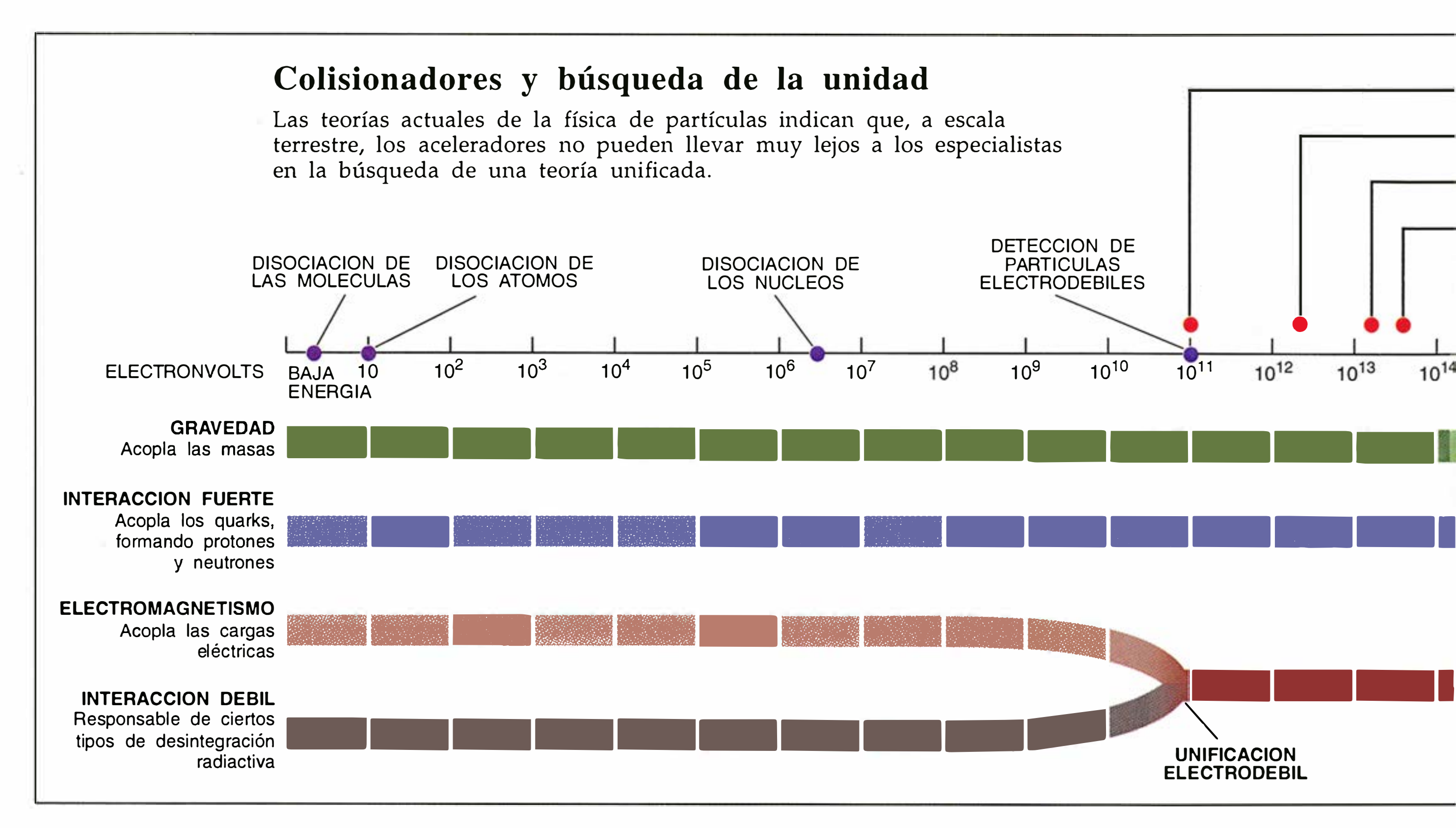
Hace más de ciento cincuenta años, Michael Faraday descubrió, gracias a una serie de brillantes experimentos, que la electricidad y el magnetismo eran manifestaciones de una misma fuerza subyacente. Movido por este éxito, se propuso demostrar que el electromagnetismo está ligado de forma similar a la gravedad, descrita matemáticamente por Newton otros ciento cincuenta años atrás. Fracasó, pero no perdió su fe en la existencia de semejante teoría unificada.

Hoy, muchos físicos —aunque no todos— han venido a compartir la creencia de Faraday en que las fuerzas de la naturaleza, distintas en su presentación, no son sino caras de una única y simétrica gema. La lucha por dar con esta piedra angular ha convertido la física moderna en una epopeya que hunde sus raíces en tiempos primigenios. En su reciente libro *El sueño de la teoría final*, el premio Nobel Steven Weinberg, de la Universidad de Texas, dice que una teoría unificada haría fructífera "la vieja búsqueda de principios que no puedan explicarse por otros más profundos". ¿Será posible que esa búsqueda no encuentre término?

La física, sin duda, se ha vuelto más complicada desde los días de Faraday. A principios de este siglo Albert Einstein reemplazó la teoría newtoniana de la gravitación, hasta cierto punto sencilla, con la relatividad general, que volvió plástica la estructura hasta entonces rígida del espacio y del tiempo. Se descubrirían después otras dos fuerzas, aparte del electromagnetismo y la gravedad: la interacción débil, que origina ciertos tipos de desintegración nuclear, y la fuerte, que mantiene juntos a protones y neutrones en los núcleos atómicos.

Hasta hace poco, se avanzaba hacia la unificación a un paso que parecía irresistible. Se había elaborado una teoría —corroborada por los aceleradores hace poco más de diez años— según la cual el electromagnetismo y la interacción débil eran dos caras de una misma fuerza electrodébil. Envalentonados por este triunfo, los físicos concibieron las teorías de gran unificación (GUT), que ligan entre sí las interacciones electrodébil y fuerte, e incluso llegaron a proponer teorías que abarcasen todas las fuerzas, incluida la gravedad; se las denomina a veces teorías cuánticas de la gravitación, pues intentan

1. EL SUPERCOLISIONADOR SUPERCONDUCTOR, veinte veces más potente que el mayor acelerador existente y cuyo costo previsto, en torno a un billón y medio de pesetas, no habría bastado para alcanzar los dominios donde se supone que las fuerzas de la naturaleza se funden. El mes de octubre pasado, gastados ya cerca de trescientos mil millones de pesetas y excavado en Waxahachie, Texas, un quinto del túnel oval que habría debido medir 86 kilómetros, el Congreso de los Estados Unidos canceló el proyecto.



Colisionadores y búsqueda de la unidad

Las teorías actuales de la física de partículas indican que, a escala terrestre, los aceleradores no pueden llevar muy lejos a los especialistas en la búsqueda de una teoría unificada.

fundir la mecánica cuántica y la relatividad general. Como estas teorías prometen esclarecer el violento nacimiento del universo, cuando reinaba, efímeramente, una sola fuerza suprema, se las llama también "teorías del todo".

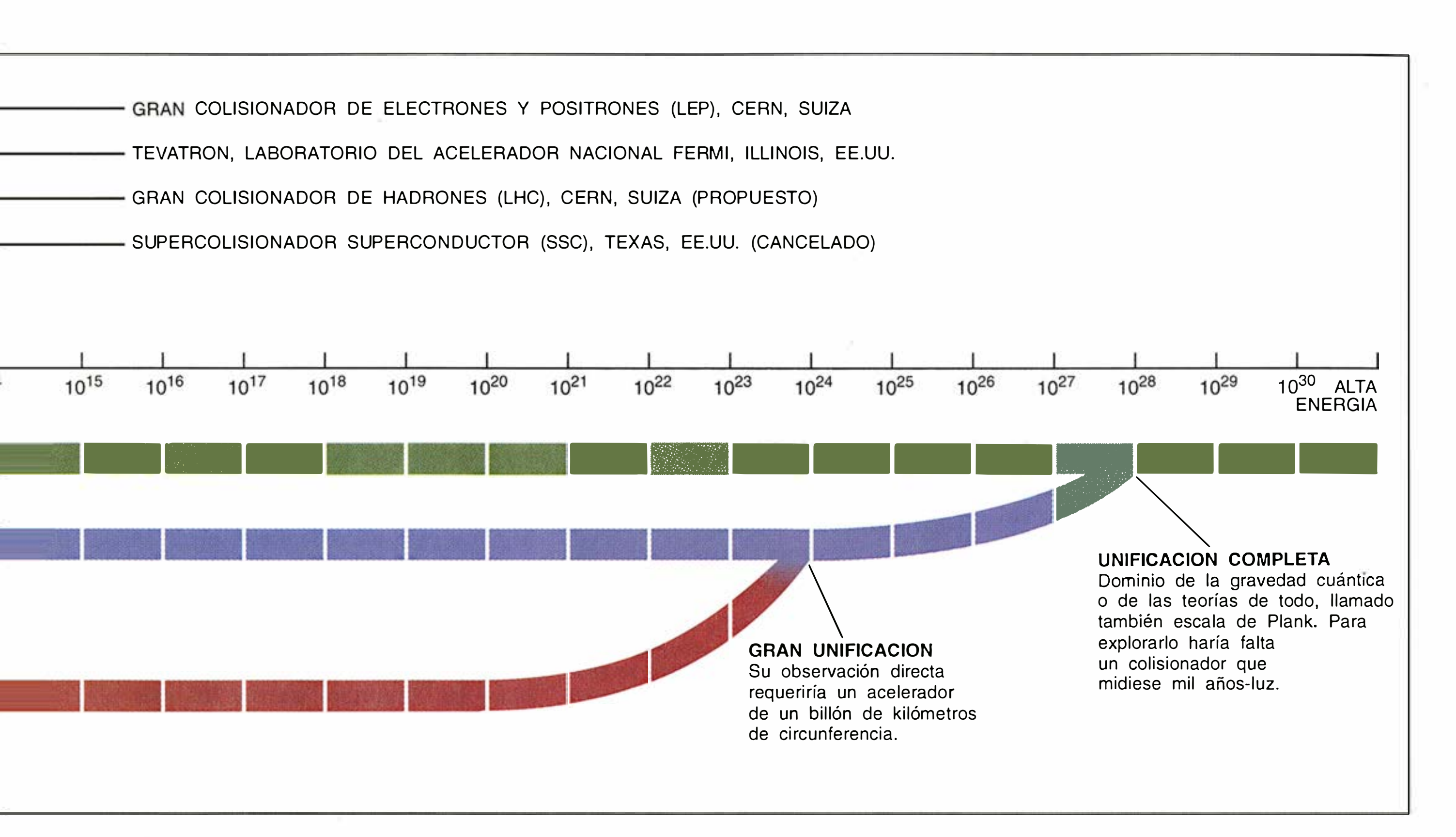
Pero ahora, justo cuando la meta se divisaba en el horizonte, los físicos han de encarar la posibilidad de que su viaje termine antes. La causa inmediata de esta inquietud es la decisión tomada por el Congreso de los Estados Unidos de cancelar la construcción del Supercolisionador Superconductor (el SSC), cuatro años después de que empezasen las obras. Leon M. Lederman, del Instituto de Tecnología de Illinois y premio Nobel, señala que la física de partículas ha avanzado gracias a la exploración de distancias cada vez menores y de energías cada vez mayores. El SSC, que habría sido por lo menos veinte veces más potente que cualquier acelerador existente, habría acercado la física a la unificación otro tanto. Pero si la física de partículas encalla, lo mismo le ocurrirá a la cosmología, que en su esfuerzo por reconstruir la historia del universo se ha vuelto más y más dependiente de las teorías unificadas.

Pero la muerte del SSC quizá sólo haya adelantado el presente estancamiento de la física. Lederman reconoce que el SSC habría sido demasiado pequeño, en varios órdenes de magnitud, para conseguir las energías a las que se supone que ocurre la unificación. Un acelerador del tipo del SSC que llegase al dominio de energías de la gran unificación debería tener una circunferencia de un billón de kilómetros; a la luz le llevaría un mes recorrer esa distancia. Un colisionador capaz de sondear el infinitesimal campo de la gravedad cuántica habría de tener un perímetro de mil años-luz. El sistema solar entero sólo mide un *día*-luz.

Ya antes de que el SSC se fuera al garete, un teórico destacado había propugnado que no se le otorgase tanta importancia a la búsqueda de una teoría unificada, pues, daba a entender, está más allá de lo que la física de partículas puede. No hace mucho, en una conferencia, Howard Georgi, de la Universidad de Harvard, llegó a expresar una especie de remordimiento por haber enunciado, veinte años atrás, una de las primeras teorías de gran unificación: "La herencia de la gran unificación, que en mi opinión es muy mala para la física de partículas, consiste en que se considere razonable —y aun de moda— que alguien que se tiene a sí mismo por teórico de partículas gaste todo su tiempo en conjeturar cómo es el mundo a distancias mucho menores que la menor que se pueda llegar a estudiar alguna vez en el laboratorio."

Otros conservan la fe. Entre ellos, John Ellis, teórico del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas radicado cerca de Ginebra. Ellis contribuyó a acuñar las denominaciones "gran unificación", a mediados de los setenta, y "teoría del todo", unos diez años después. "Aún es posible progresar en la dirección tradicional", dice. Observa que el CERN quiere construir un acelerador casi tan potente como el SSC de aquí a diez años. Hasta entonces, se podrán ir sumando indicios procedentes de los experimentos de alta precisión (llevados a cabo con los aceleradores existentes), del estudio de los neutrinos (que, pese a ser casi inaprensibles, tienen un papel destacado en muchas teorías de unificación) y de la observación de la radiación cósmica de fondo, de la que se cree que es un residuo de una era inmediatamente posterior a la gran explosión ("big bang") y en la que las fuerzas naturales todavía estaban entrelazadas.

A largo plazo, gracias a colisionadores de nuevo cuño, como el que impulsa partículas sobre ondas de plasma, se podrán explorar energías mayores a menor precio. Y siempre cabe que avances matemáticos o conceptuales propicien un conocimiento más profundo aun sin guía experimental. Pero reconoce que "a no ser que alguien tenga una idea muy buena, me parece que", en el futuro previsible, "sólo veremos pruebas indirectas" de la unificación. Frank A. Wilczek, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, está de acuerdo. "Hemos disfrutado realizando progresos fundamentales", pero la probabilidad de que siga siendo así está disminuyendo de verdad, corrobora.



En cierto sentido, los físicos son víctimas de su propio éxito. Levantaron una teoría que da cuenta de las interacciones entre partículas con exactitud extraordinaria. Recibe el nombre de Modelo Estándar (o, como dice Michael Dine, de la Universidad de California en Santa Cruz, la "teoría de casi todo"), y descansa en el firme cimiento de la mecánica cuántica, la radical teoría de la materia y la energía creada por gigantes de la talla de Niels Bohr, Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger en los años veinte y treinta. En los cincuenta, Richard Feynman, entre otros, ideó una teoría del electromagnetismo, la electrodinámica cuántica, que explica casi todos los fenómenos químicos y electrónicos.

Durante el decenio siguiente se desarrolló una teoría de la interacción nuclear fuerte: la cromodinámica cuántica, según la cual protones y neutrones son manifestaciones de partículas más elementales, los quarks. Cada protón y neutrón se compone de tres quarks, que se mantienen unidos por partículas que transmiten entre ellos la interacción fuerte, los gluones. (El prefijo "cromo", o "color", alude a la propiedad en razón de la cual se clasifican los quarks; el "color", propiedad mecanocuántica, no tiene nada que ver con el significado usual de la palabra.)

Se dio un paso enorme hacia la unificación en los años sesenta, cuando Weinberg, Sheldon L. Glashow, de Harvard, y Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, entre otros, establecieron que el electromagnetismo y la interacción nuclear débil son en realidad dos manifestaciones de una misma fuerza electrodébil. Tanto la cromodinámica cuántica como la teoría electrodébil han superado pruebas cada vez más rigurosas en los laboratorios de los mayores aceleradores del mundo, en especial el Centro del Acelerador Lineal de Stanford, o SLAC, el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi, o Fermilab, en Batavia, y el CERN.

La unidad haría la fuerza

En cuanto los experimentadores corroboraron el "modelo estándar", estuvieron dispuestos a echarlo por tierra. En 1983, Carlo Rubbia anunció que un equipo del CERN a sus órdenes había observado, no sólo las partículas *Z* y *W*, que transmiten la fuerza electrodébil, sino también "monochorros", fenómeno que, en apariencia, iba en contra del modelo estándar. Rubbia compartió el premio Nobel por haber descubierto las partículas *Z* y *W*, pero pronto se vio que el modelo estándar explicaba los monochorros.

Mientras, los teóricos ya habían ido mucho más allá del modelo estándar en busca de una teoría más profunda. Les daba alas que tanto la cromodinámica cuántica como la teoría electrodébil fuesen teorías de aforo, en las que todos los elementos de un sistema sufren transformaciones —del estilo de rotaciones o reflexiones especulares— sin que por ello se alteren en esencia. Esta característica, la simetría, ha llegado a ser para muchos físicos de partículas la quintaesencia de la verdad y la belleza.

A principios de los años setenta Glashow y Georgi, colega suyo en Harvard, más joven que él, crearon una teoría de aforo, la SU(5), que abarcaba a la vez las interacciones débil y fuerte. (La denominación "SU(5)" se refiere al número y tipo de simetrías de la teoría.) La teoría de gran unificación —expresión que ni inventaron ni les convence— predecía algo que, en aquella fecha, resultaba chocante: los quarks, parecía, podían convertirse en neutrinos, electrones y sus propias antipartículas; en consecuencia, los protones (que están formados por quarks) serían inestables y terminarían por desintegrarse. Aunque la vida media de cada protón era mucho mayor que la edad del Sol (según calcularon más tarde Weinberg, Georgi y Helen Quinn, del SLAC), se podía contrastar la predicción observando un número suficientemente grande de protones.

Se han construido detectores de desintegraciones de protones en media docena larga de puntos repartidos por el mundo. Casi todos están instalados a gran profundidad, para que sean mínimas las interferencias de rayos cósmicos (partículas de alta energía que vienen del espacio exterior).

Uno de los experimentos principales empezó a operar, diez años atrás, en una mina cerca de Cleveland, Ohio. Consta de un estanque inmenso de agua rodeada por detectores que vigilan los ínfimos destellos de luz que se producirían si un protón se desintegrase en el agua. Hasta ahora, ni este ni ningún otro detector ha observado la desintegración de un protón.

Que la experiencia no respaldase la teoría SU(5) abrió la puerta a otras posibilidades, sobre todo a un enfoque más general, la supersimetría. Según ésta, los fermiones, que son las partículas que constituyen la materia, y los bosones, que transmiten las fuerzas, comparten simetrías profundas, lo que requiere que cada partícula conocida tenga una compañera supersimétrica dotada de bastante masa o "partícula-*s*". Un rasgo curioso de la supersimetría es el relativo a su potencia, que aumenta si se generaliza en un número adicional de dimensiones. Así como un astronauta que se eleva sobre la superficie bidimensional de la Tierra capta su simetría global, los teóricos disciernen las simetrías más sutiles que se esconden bajo las interacciones entre las partículas contemplándolas desde la atalaya de un número de dimensiones acrecentado.

Se han formulado varias teorías de gran unificación supersimétricas, e incluso teorías cuánticas de la gravedad. Ejemplo de las últimas es la supergravedad, donde los gravitones, partículas trasmisoras de la gravedad, tienen compañeros supersimétricos, los gravitinos. En 1980, la supergravedad parecía tan prometedora que Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, anunció que quizá fuese la tan ansiada "teoría unificada y completa de la física". Pero la supergravedad zozobró pronto en los problemas matemáticos que se derivan de que los gravitones se definan como puntos. Lo mismo que al dividir por cero sale infinito y el resultado carece de sentido, así ocurre con los cálculos relativos a partículas puntuales. Las teorías de aforo han servido para construir modelos del electromagnetismo y de las fuerzas nucleares que solventan este problema. Pero la gravedad, con sus distorsiones del espacio y del tiempo, parece demandar un enfoque aún más radical.

Muchos creen que ese enfoque es el de las supercuerdas. A principios de los años setenta se planteó que la interacción nuclear fuerte podía dimanar de las interacciones de partículas con forma de cuerdas. De la misma manera que las vibraciones de las cuerdas de un violín producen notas diferentes, así las vibraciones de esas cuerdas generarían las partículas sometidas a la interacción fuerte.



2. STEVEN WEINBERG, de la Universidad de Texas, destacado abogado de la unificación, teme que sea difícil progresar más si no se construye un acelerador de alta energía.

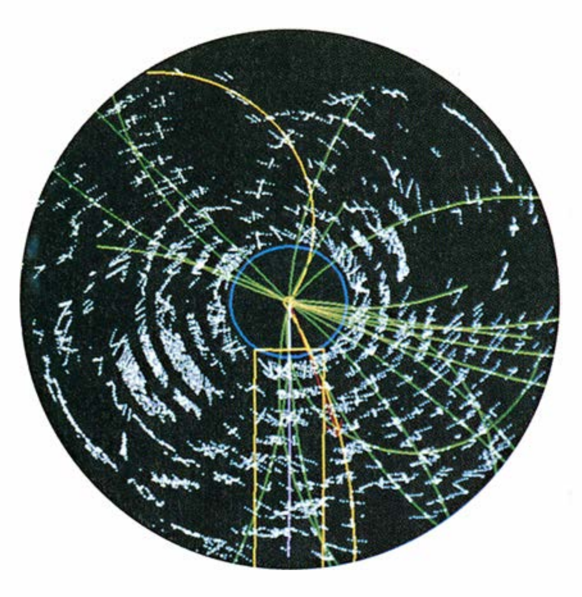
Este camino fue abandonado en favor del método de los quarks y los gluones, muchísimo más eficaz. Pero la teoría de cuerdas resucitó, en forma supersimétrica, a finales de los setenta, gracias a Michael B. Green, del Colegio Queen Mary de Londres, y John H. Schwarz, del Instituto de Tecnología de California. Un poco para su sorpresa, vieron que las cuerdas supersimétricas generaban todas las fuerzas de la naturaleza, incluida la gravedad; y lo que era aún mejor, al sustituir los puntos por cuerdas se eliminaban muchos de los problemas matemáticos planteados por otras teorías de la gravitación.

La teoría exige que se den por aceptados determinados supuestos sobre la realidad física un tanto extraños. Así, las cuerdas ocupan nada menos que 26 dimensiones; en proporción, su tamaño es al del protón lo que el de éste al sistema solar. No hay experimento concebible que llegue a este microdominio, el de la escala de Planck. Sin embargo, los físicos, y cada vez más los matemáticos, se han dejado ganar por la rica estructura de la teoría. Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, uno de los más destacados téoricos de las supercuerdas, ha ejercido en matemáticas no menos influencia que en física.

Pero el propio Witten, cuyo talento analítico es legendario, se las ha visto y deseado para vincular las supercuerdas a fenómenos físicos conocidos. Hace poco ha tendido un puente entre las supercuerdas y los agujeros negros, que habían venido siendo el coto de los expertos en relatividad general. En 1991 Witten mostró que la teoría de supercuerdas podía dar como resultado agujeros negros, si bien simplificados, bidimensionales. El artículo provocó una explosión de actividad teórica que no ha cesado todavía.

Las supercuerdas podrían también ayudar a solucionar cierto rompecabezas que tiene que ver con los agujeros negros y que planteó Hawking hace veinte años. Mostró éste que, a causa de efectos cuánticos, los agujeros negros radiaban energía —y por tanto masa— hasta terminar por esfumarse. "Los agujeros negros no son tan negros", sentenció. Como un agujero negro es, en principio al menos, el registro de los procesos que lo crearon, su desaparición tiene por consecuencia una pérdida absoluta de información. Se erradica, por decirlo así, el pasado. Hawking proclamó que había descubierto una paradoja que sólo podía resolverse mediante la modificación de la mecánica cuántica o la relatividad general.

En un artículo publicado en octubre por *Physical Review*



3. EL QUARK CIMA es la única pieza del modelo estándar que no se ha detectado aún de una manera incontrovertible. Esta imagen muestra un suceso que podría encerrar un quark cima, captado en el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi en 1989.

Letters, Leonard Susskind, de la Universidad de Stanford, señala que las supercuerdas podrían resolver el problema. La paradoja de Hawking, explica Susskind, nace del supuesto, implícito en la relatividad general, según el cual observadores diferentes se hacen un mismo cuadro de cómo se almacena la información en una región dada del espacio y el tiempo. Pero, según la teoría de supercuerdas, diferentes observadores se forman imágenes diferentes. Para cualquier observador por separado, el pasado persiste.

Los críticos alegan que todos estos trabajos ni siquiera son física, pues nada tienen que ver con los fenómenos que están a nuestro alcance experimental. Susskind replica que la física ya no puede progresar por los caminos tradicionales. "No hay esperanza alguna de alcanzar la escala de Planck de esa manera."

Buscando datos desesperadamente

La mayoría de los teóricos, sin embargo, se mueren por sacar de los experimentos algún indicio de que van bien encaminados. Muchos han puesto sus esperanzas en hallar pruebas de la supersimetría, comprobación necesaria pero no suficiente de las supercuerdas.

El CERN ha dado ya una posible prueba de la supersimetría. Se han efectuado allí mediciones de alta precisión de las constantes de acoplamiento del electromagnetismo, la interacción débil y la fuerte. (La constante de acoplamiento de una fuerza es una medida de su intensidad.) Las teorías de gran unificación predicen que las constantes de acoplamiento de las tres fuerzas de corto alcance, que tienen diferentes valores a bajas energías, deberían converger a altas energías. Los datos del CERN no concuerdan con las predicciones de la vieja teoría de gran unificación SU(5), pero cuando se suma la supersimetría las predicciones casan "exactamente", según Ellis.

No a todos convencen estos resultados. "Yo no saltaría de alegría todavía", dice Alvaro de Rújula, del CERN también. Señala que las tendencias medidas en el CERN respaldan la supersimetría sólo si se las extrapola varios órdenes de magnitud. Quizás otros experimentos exploren pronto terrenos que caen más allá del modelo estándar. El Fermilab aún anda tras el quark cima ("top"), partícula predicha por el modelo estándar que no se ha capturado todavía. Si se siguiese fracasando en la busca de ese quark, el modelo estándar quedaría cuestionado. Sin embargo, es posible que ya se haya vislumbrado la partícula en el margen de masas esperado, y casi todos los observadores creen que pronto se anunciará su descubrimiento.

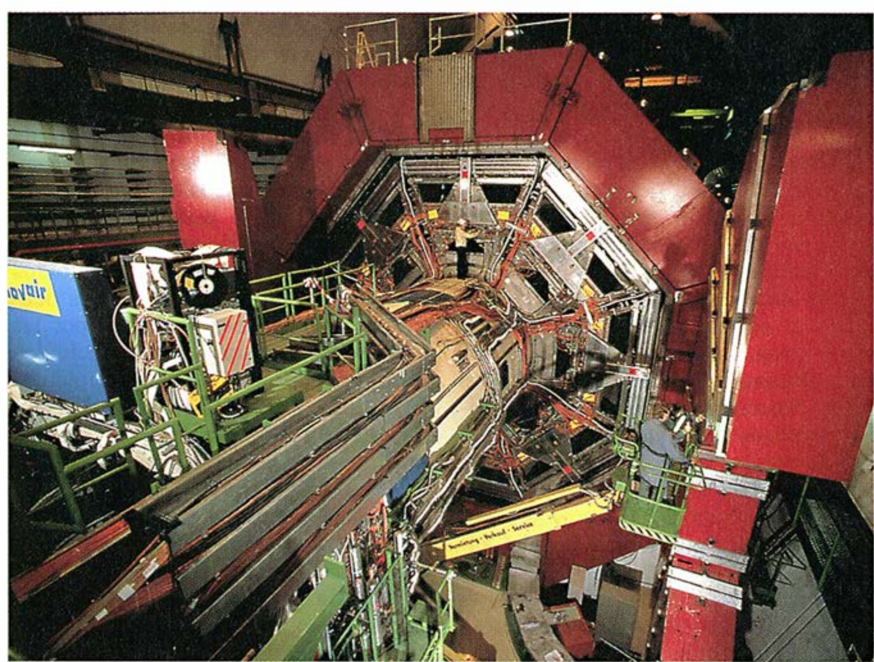
Fermilab y CERN tienen proyectadas ampliaciones de sus aceleradores principales. El primero espera aumentar la densidad de haz del Tevatrón, que aplasta protones contra antiprotones. El CERN se propone doblar la potencia de su gran colisionador de electrones y positrones (el LEP). Con estas máquinas habrá una nueva oportunidad de hallar partículas supersimétricas. Más remota aún es la posibilidad de que gracias a ellas se encuentre el bosón de Higgs. Los teóricos creen que esta partícula desempeña un papel crucial en la ruptura de la simetría del electromagnetismo y la interacción débil a altas energías. El bosón de Higgs podría además esclarecer por qué las partículas tienen masas tan dispares y arbitrarias.

Los aceleradores quizá mantengan a los teóricos ocupados con el estudio de los mesones, partículas de vida cortísima que constan de un quark y un antiquark. Experimentos realizados en los años sesenta con los mesones *K*, o kaones, condujeron al descubrimiento de que la antimateria no era imagen especular de la materia, sino que hay una sutil asimetría entre ambas. Se ha conjeturado que, sin esa asimetría, a la que se da el nombre de violación de la paridad de carga, el universo no existiría, pues la gran explosión ("big bang") habría generado exactamente la misma cantidad de materia y antimateria, que se aniquilan en cuanto entran en contacto.

Se espera ahondar más en estas ideas mediante experimentos con los mesones *B*, que, según se cree, muestran la violación de la paridad de carga más a menudo que los mesones *K*. El otoño pasado, el decreto que acabó con el SSC autorizó la construcción de una instalación para la producción de grandes cantidades de mesones *B* en el SLAC. Esta "fábrica de *B*" podría dar lugar a resultados que refutasen el modelo estándar, que permite la violación de la paridad de carga sólo dentro de ciertos parámetros.

De los observatorios de neutrinos pueden también salir hallazgos cuyas consecuencias se perciban a escala cósmica. Los neutrinos, a los que siempre se llama "esquivos" porque





4. LABORATORIO EUROPEO DE FISICA DE PARTICULAS situado cerca de Ginebra, el CERN (*arriba*). Una vez suprimido el SSC, los físicos de partículas han depositado en él su mayor esperanza. Los responsables de la organización esperan construir, la década que viene, el acelerador más potente del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones, en el túnel de veintisiete kilómetros que ahora aloja el Gran Colisionador de Electrones y Positrones. Abajo se muestra uno de los voluminosos detectores de éste.

¿Necesita la física de partículas un paradigma nuevo?

Aunque cuesta entenderla y manejarla, la teoría de supercuerdas es, de lejos, la candidata mejor colocada para representar la teoría cuántica de la gravitación. Una razón de que sea así es, quizá, que recoge ideas, como la de simetría, profundamente enraizadas en la física de partículas. Algunos teóricos creen que va siendo hora de tomar en cuenta nuevos enfoques.

Un modelo innovador de gravedad cuántica es el esbozado, a lo largo de los últimos seis años años, por especialistas en relatividad general. Nos referimos a la "teoría del espacio de bucles", o teoría de Ashketar, pues Abhay Ashketar, de la Universidad de Syracuse, fue uno de sus creadores. Ashketar y los suyos dieron con una manera de reescribir las ecuaciones de la relatividad general de suerte que semejaran ecuaciones de la electrodinámica cuántica.

Con ese método puede abordarse la gravedad como si se tratara de un fenómeno cuántico, sin tropezar con los problemas matemáticos que han frustrado otros intentos. Una de las consecuencias de la teoría es que el espacio no es un ente de una pieza sino que está compuesto, como una cota de malla, por bucles discretos infinitesimales.

Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, defiende un planteamiento más radical. 'T Hooft desempeñó un papel muy importante en el desarrollo de las teorías de aforo, el lenguaje en que está escrito el modelo estándar. Sin embargo, ha ido sintiendo cada vez una mayor insatisfacción con la manera en que hoy se aborda la gravedad cuántica; le parece que se presta poca atención a conceptos tan esenciales como el de causalidad.

Sugiere la construcción de modelos físicos basados en los autómatas celulares, creaciones de la ciencia de la computación en las que la causalidad es un rasgo fundamental. Consisten en una red de unidades discretas, o celdillas, que evolucionan de acuerdo con reglas específicas. El estado de cada celdilla queda determinado por los estados de sus vecinos inmediatos.



LA TEORIA del espacio de bucles se representa mediante una escultura hecha de anillas de llavero.

Aboga también por nuevas maneras de pensar Roger Penrose, de la Universidad de Oxford. Pone en entredicho la suposición, aceptada por la mayoría de los físicos de partículas, de que la simetría no es sólo una característica fundamental de sus teorías, sino también de la naturaleza. Esta creencia, se lamenta Penrose, descansa en última instancia en una preferencia estética, que él no tiene por qué compartir necesariamente. "En mi opinión, si hay una teoría final, su concepción sería de muy diferente naturaleza. Más que una teoría física en el sentido corriente, tendría que ser un principio, un principio matemático cuya ejecución quizá requiriese una sutileza no mecánica."

apenas si interaccionan con la materia normal y, por tanto, son muy difíciles de detectar, desempeñan un papel crucial en las interacciones electrodébiles y en las teorías cosmológicas. Desde los años setenta, los detectores subterráneos —algunos de los cuales se construyeron para detectar la desintegración del protón— han observado que el Sol emite menos neutrinos de lo predicho por el modelo estándar.

Dos nuevos detectores han confirmado el déficit de neutrinos solares; están instalados también bajo tierra, para eliminar las señales debidas a los rayos cósmicos, y captan los neutrinos mediante compuestos de galio en vez de vasijas llenas de fluidos. Reciben los nombres de "Experimento Soviético-Americano del Galio (o SAGE)", enterrado bajo una montaña del Cáucaso ruso, y "Experimento del Galio (o GALLEX)", integrado en el laboratorio del Gran Sasso, en los Apeninos.

Una explicación de la discordancia sería que los neutrinos "oscilasen" entre varios tipos y pasaran, de ser neutrinos electrónicos, a versiones más difíciles de detectar. En eso consiste la conjetura MSW, formulada por Stanislaw P. Mikheyev y Aleksei Y. Smirnov, ambos de la Academia de Ciencias de Moscú, y Lincoln Wolfenstein, de la Universidad Carnegie-Mellon. Las oscilaciones sólo podrían darse si los neutrinos tuviesen masa, lo que contradiría la versión más estricta del modelo estándar.

John N. Bahcall, del Instituto de Estudios Avanzados, autoridad en neutrinos, admite la posibilidad de modificar el modelo estándar para que dé cabida a neutrinos oscilantes con masa. Por otra parte, los resultados obtenidos hasta ahora caen todos dentro de los márgenes predichos por las teorías de gran unificación, incluidas las que incorporan la supersimetría. Estudios más detallados "podrían servir para comprobar cuál de las muchas teorías de gran unificación es la correcta", añade Bahcall. Si se confirmase que los neutrinos tienen masa, serían candidatos principales a convertirse en los constituyentes de la materia "oscura", la materia "que falta" y que, según la mayoría de los cosmólogos, inunda el universo. En los próximos años habrán de llegar más datos a medida que nuevos detectores, sumamente sensibles, entren en funcionamiento en Japón y Canadá. Al mismo tiempo, experimentos basados en aceleradores —entre ellos dos en el CERN y otro en el Gran Sasso— intentarán determinar la masa de los neutrinos.

Weinberg advierte que no debe tenerse demasiada confianza en que estos experimentos propicien un nuevo cañamazo teórico para la física: "Podría haber suerte de varias maneras en los próximos cinco o diez años, pero llevamos diciendo lo mismo desde hace diez o quince." Glashow no es más optimista. Pone en duda que vuelva a haber experimentos de baja energía que puedan violar el modelo estándar. Recuerda los numerosos anuncios de fenómenos así en los últimos años —como el de una inédita "quinta fuerza" de la naturaleza que contrarrestaría la de la gravedad, el de neutrinos muy pesados (17.000 electronvolts) y el de los monopolos, partículas exóticas que sólo poseerían un polo magnético—, ninguno de los cuales se ha mantenido en pie. "En mi opinión, el problema es evitar que la comunidad de los físicos de altas energías se desbande" mientras se construye el próximo gran acelerador, confiesa Glashow.

El Supercolisionador Superconductor, se lamentan Weinberg y Glashow, era la mejor vía posible para que naciese una nueva física. A menudo se decía del SSC que era la máquina

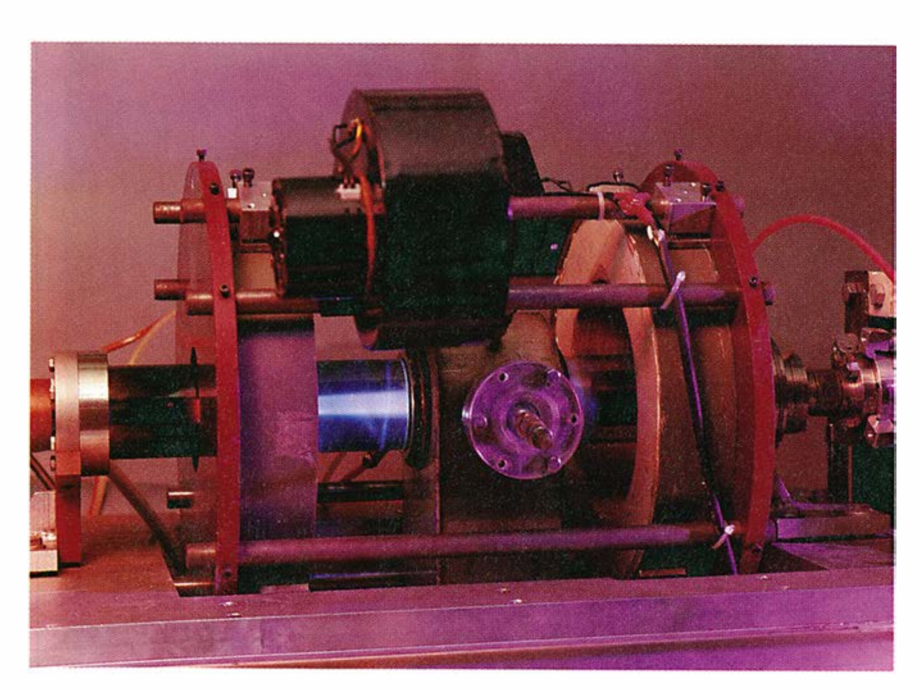
que permitiría descubrir el bosón de Higgs. Pero, como indica De Rújula, el descubrimiento del bosón de Higgs no tendría por qué poner la física patas arriba; confirmaría crucialmente la teoría electrodébil, pero, en sí mismo, no pasaría de ser una extensión del modelo estándar.

La supersimetría era un objetivo mucho más importante del SSC, según David J. Gross, de la Universidad de Princeton. "Habría sido un gran descubrimiento, equiparable al mayor que se haya hecho en este siglo", dice Gross, que desempeñó un papel de peso en el desarrollo de la cromodinámica cuántica y ahora es un destacado partidario de las supercuerdas. "Habría expandido nuestra visión del espacio y del tiempo. Habría demostrado la existencia de otras dimensiones." John P. Preskill, del Caltech, tenía la esperanza de que el SSC encontrase algo absolutamente inesperado.

Desaparecido el SSC, los físicos toman como tabla de salvación el Gran Colisionador de Hadrones, o LHC, triturador de protones parecido al SSC, pero más pequeño, que quizá se construya en el CERN. Esta organización quiso, en su momento, construir la máquina antes de que estuviese terminado el SSC, con lo que, posiblemente, habrían descubierto el bosón de Higgs los primeros. La mayor ventaja del LHC es que se instalaría en un túnel de veintisiete kilómetros de largo que ya existe y donde ahora funciona el colisionador LEP. Responsables del CERN calculan que el LHC costaría menos de cuatrocientos mil millones de pesetas, es decir, menos que un tercio del costo del SSC.

Hay quienes han expresado la inquietud de que la Comunidad Europea siga los pasos del Congreso de los Estados Unidos y cancele la construcción del LHC o le dé indefinidamente largas. Sin embargo, Christopher Llewellyn Smith, que sucedió a Carlo Rubbia en la dirección general del CERN, confía en que el LHC se llevará a buen término y entrará en funcionamiento a principios del siglo que viene. "Confiaba en que así sería en cualquier caso, pero ahora tiene que salir adelante, pues no habrá otro", apostilla. Reconoce que algunos miembros del CERN temen que "sus voces se pierdan" si los Estados Unidos deciden contribuir al LHC, pero insiste en que "es nuestra obligación hallar la manera" de que los físicos norteamericanos participen. Espera que el CERN ponga en marcha el LHC hacia el 2003.

Pero no hay garantía alguna de que el LHC se llegue a construir (o de que fuese un éxito). Sería más barato que el SSC, pero también se correrían con él más riesgos, tal y como les gustaba señalar a los físicos estadounidenses antes de que su acelerador sucumbiese. Como la energía del LHC sería sólo un tercio de la del SSC, la probabilidad de que diese con la partícula de Higgs, la supersimetría o algo inesperado sería menor. Además, para obtener esa energía en su relativamente pequeño túnel, hay que llevar la técnica de los imanes



5. UN HAZ DE ELECTRONES destella a través de una cámara de plasma en una demostración de la técnica de la aceleración mediante una estela de campo en el Laboratorio Nacional de Argonne.

Las crisis de la física: ¿será ésta la última?

¿No estará viviendo la física en la oscuridad que precede al amanecer? Los físicos que quieren hoy justificar este optimismo se refugian en la historia de su propia ciencia, donde hay muchos ejemplos de crisis que terminaron por superarse.

Quizás el más notable de esos períodos sea el que tuvo lugar a principios de este siglo. El descubrimiento de los rayos X, los electrones, los protones y otras formas de radiación que emanaban de los átomos había tensado la física clásica hasta el punto mismo de rotura. Y lo mismo pasó con los problemas suscitados por experimentos ópticos, que las nociones de sentido común acerca del espacio y del tiempo no podían resolver.

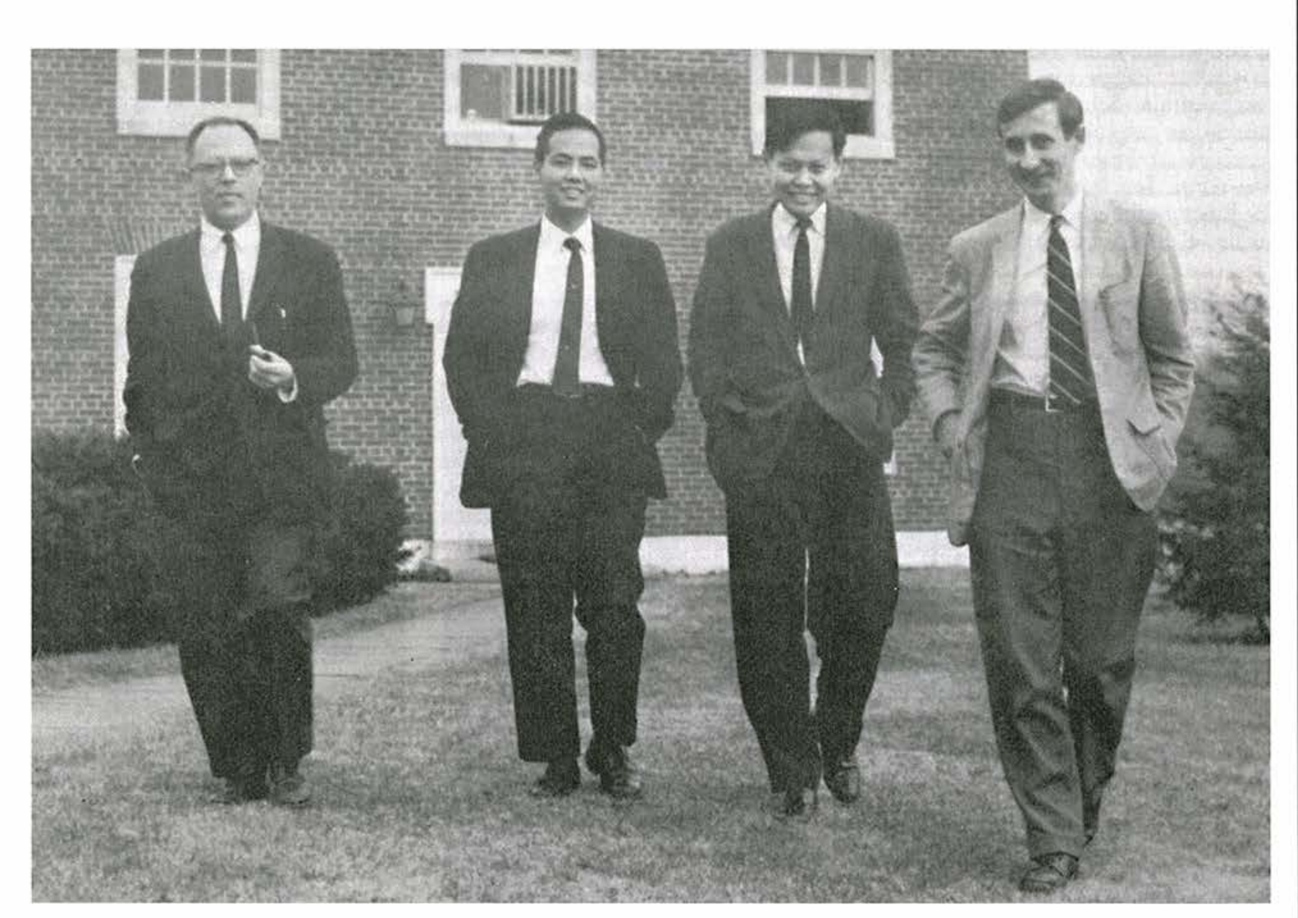
En 1904, algunos de los físicos más destacados del mundo se reunieron en el Congreso de Artes y Ciencias, en San Luis, Missouri, para discutir la difícil situación de la física. En el encuentro, Ernest Rutherford, Henri Poincaré, Ludwig Boltzmann y otras luminarias perfilaron los dilemas a que se enfrentaban y sugirieron posibles soluciones.

Chen Ning Yang, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, apostilla, tras leer todos aquellos discursos. "Todos reconocían que había una gran crisis", observa Yang, que compartió en 1957 el premio Nobel por haber propuesto un experimento que confirmó la existencia de una sutil asimetría, o "quiralidad", en ciertas interacciones de partículas. "Se lamentaban de que todo lo que, según habían estado creyendo, comprendían bien estuviese equivocado."

Sólo unos pocos meses después, Albert Einstein formuló su teoría de la relatividad especial, que resolvía las paradojas planteadas por la propagación de la luz mediante una concepción radicalmente nueva del tiempo y del espacio. En los veinte años siguientes se desarrolló la mecánica cuántica, que proporcionó una descripción extraña pero asombrosamente exacta del comportamiento de los átomos.

Pero Yang advierte que la crisis de 1904 fue muy distinta de la actual. El conflicto se debió entonces a que las ideas preestablecidas eran incapaces de explicar resultados experimentales. "Un conflicto así es bueno", afirma Yang. "Ahora tenemos problemas de un tipo diferente." Hay desacuerdo entre la relatividad general y la mecánica cuántica, pero no se puede concebir un experimento que aborde esa incompatibilidad directamente.

"No se realizan experimentos que puedan reportar un progreso considerable", comenta Yang; y prosigue: "Sin contrastaciones, es como andar a ciegas." Se podría progresar si se nos bendijera con un gran avance matemático, pero Yang advierte que, históricamente, ello ha ocurrido rara vez. Sea como sea, no es probable que pase ni una cosa ni la otra en los próximos veinte años. La física de partículas, dice, "tiene problemas serios, muy serios".



La física avanzaba alegre y confiada a comienzos de los años sesenta, cuando fue tomada esta fotografía en la que aparecen, de izquierda a derecha, A. Pais, T. D. Lee, Chen Nin Yang y F. J. Dyson. Detrás, el edificio E del Instituto de Estudios Avanzados, de Princeton. Yang rastrea en la historia los problemas por los que atraviesa hoy la física.

superconductores al límite. Sin embargo, los físicos estadounidenses están haciendo en estos momentos campaña a favor de la máquina que antes criticaron. EL LHC es "ahora nuestra mayor esperanza", dice Weinberg.

A lomos del plasma

Algunos, los que se aventuran con la gravedad cuántica sobre todo, esperan que su especialidad progrese gracias a un logro teórico espectacular que permita un conocimiento mayor de fenómenos accesibles experimentalmente. Witten sostiene que la física puede dar un salto hacia delante si se descubre lo que él llama "el núcleo de principios geométricos" que se esconde bajo la teoría de supercuerdas. Gross, que comparte su entusiasmo por las cuerdas, añade: "Imagino estados de cosas donde triunfamos sin el aval de la experimentación."

A Sidney R. Coleman, de Harvard, renombrado por sus trabajos sobre fenómenos tan conjeturales como los universos paralelos y los agujeros de gusanos —roturas de la fábrica del espacio y el tiempo—, le parece improbable que haya semejantes estados de cosas. "Los experimentos son la fuente de la imaginación científica", corrige. "Ni todos los filósofos del mundo pensando durante miles de años podrían haber ideado la mecánica cuántica."

Samuel C. Ting, profesor del Instituto de Tecnología de Massachusetts y jefe del mayor detector del LEP ginebrino, es de la misma opinión. Indica que, en este siglo, apenas si ha habido avance de la física "que no se debiera a un hallazgo experimental inesperado". El descubrimiento de la antimateria (predicho por P. A. M. Dirac en 1930) y de las partículas *Z* y *W* (predicho por Weinberg y otros) son excepciones a esa regla. Fue más normal el descubrimiento, en los años cincuenta, de una sutil asimetría en el comportamiento de ciertas partículas que no sólo era inesperada, sino que, se creía, estaba prohibida por las leyes de la física.

"Necesitamos ideas revolucionarias para el diseño de aceleradores más que nuevas teorías", aduce Ting. "No abundan en las universidades los cursos sobre aceleradores. Sin esa disciplina, y sin nuevas ideas, la especialidad morirá." Y así sería, añade, aunque se hubiera construido el SSC.

Desde hace algún tiempo hay planes para diseñar un gran acelerador lineal, que sería menos potente que el SSC pero ofrecería datos más precisos, más "limpios". El proyecto, en el que cooperan físicos estadounidenses, europeos y asiáticos, recibe el nombre de Próximo Colisionador Lineal, o NLC. Tal y como se lo concibe en estos momentos, consistiría en un túnel de unos veinte kilómetros de largo donde los electrones y los positrones se precipitarían frontalmente unos sobre otros.

Se está tanteando la posibilidad de aceleradores de un tipo completamente distinto en la Universidad de California en Los Angeles y en el Laboratorio Nacional de Argonne, entre otros lugares. La técnica de la aceleración mediante impulsos de ondas de plasma consiste en enviar un pulso de láser a través de una cámara de plasma, estado de agregación formado por partículas con cargas opuestas. El pulso electromagnético crea una onda en el plasma, a lomos de la cual los electrones se montan con grandes energías. Un método similar, la aceleración mediante una estela de campo, no generaría la onda con un láser, sino con un haz de electrones.

Georgi insiste en que ninguna máquina confirmará la gran unificación; como mucho, habrá experimentos que aporten pruebas circunstanciales. Los físicos estadounidenses temen que la especialidad, a la espera de algún avance extraordinario en aceleradores o en la teoría, se desintegre. Lederman, infatigable abogado de la enseñanza de la ciencia que todavía imparte clases de física en los primeros cursos, recuerda que tras el fin del SSC algunos de sus estudiantes le han manifestado su preocupación. "Me preguntan, ¿qué va a pasar?", cuenta. "Les digo que no lo sé." Se ensimisma por un momento, y sigue diciendo: "Si fuese joven, me dedicaría a la ciencia del cerebro, a la de la computación o a la del caos."

Faraday expresó mejor que nadie por qué cuesta tanto abandonar la esperanza en que haya una sola fuerza que rija la naturaleza entera. "Si se probase que esa esperanza está bien fundada", escribió, "¿cuán grande y poderosa y sublime en su hasta ahora inmutable carácter es la fuerza con la que quiero enfrentarme, y cuán vasto no será el nuevo campo del conocimiento que se abrirá al espíritu humano?"

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DREAMS OF A FINAL THEORY. Steven Weinberg. Pantheon Books, 1992.

THE END OF PHYSICS: THE MYTH OF A UNIFIED THEORY. David Lindley. Basic Books, 1993.

THE GOD PARTICLE: IF THE UNIVERSE IS THE ANSWER, WHAT IS THE QUESTION? Leon Lederman y Dick Teresi. Houghton Mifflin Company, 1993.

Ciencia y empresa

Centrales térmicas

Corrosión marina

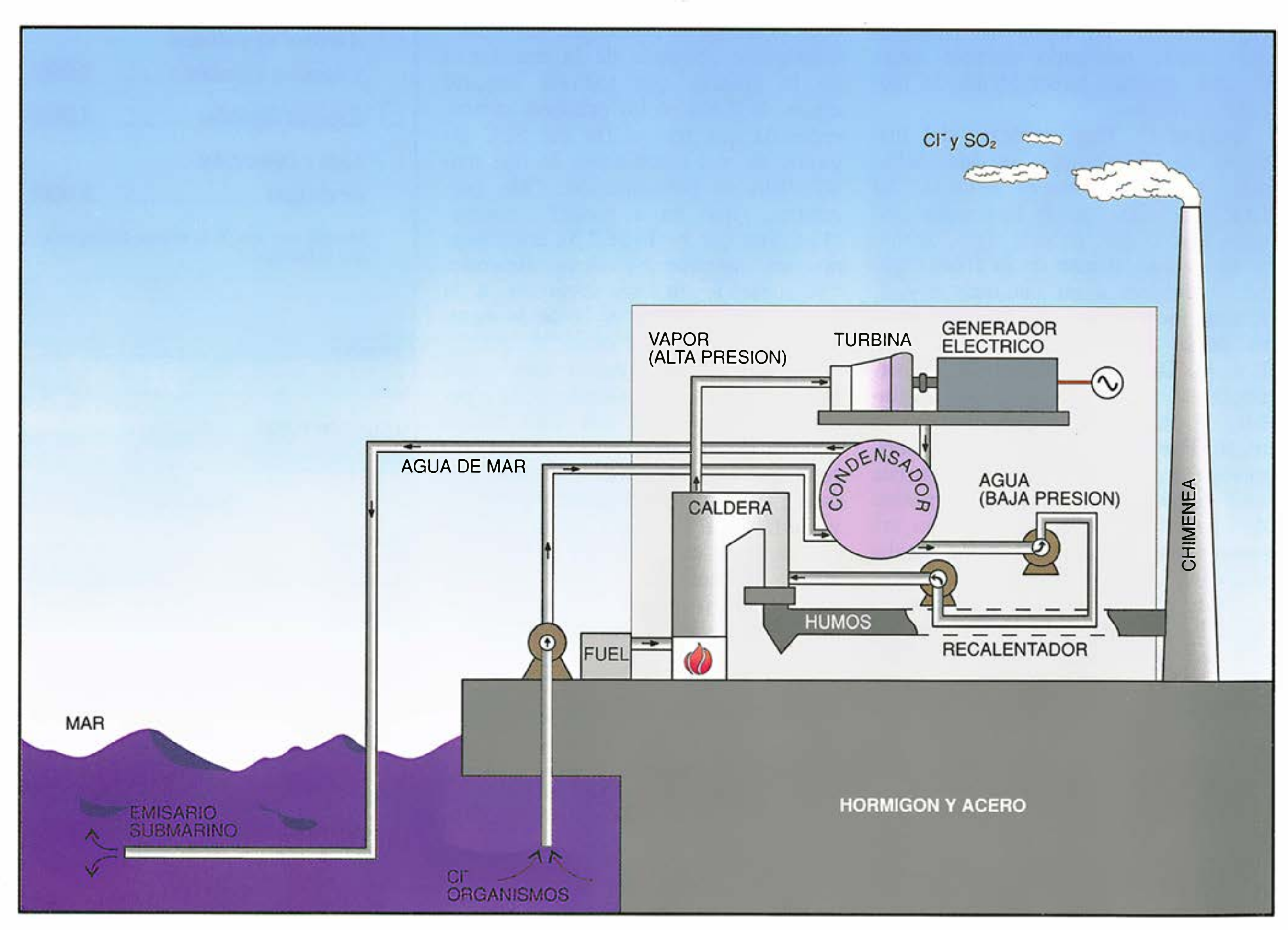
Las centrales térmicas generan energía eléctrica. En las centrales térmicas de vapor, la energía calorífica obtenida quemando combustibles fósiles, como carbón o fuel, se emplea en generar vapor de agua a alta presión, capaz de accionar la máquina motriz que se encuentra acoplada a un alternador y produce energía eléctrica. Un tipo habitual de máquina motriz son las turbinas; accionadas por el vapor de agua, aportan el trabajo mecánico necesario para el funcionamiento de los generadores eléctricos. Las máquinas motrices pueden trabajar con condensador o sin él. En las centrales con condensador, las máquinas motrices descargan el vapor en condensadores en cuyo interior la presión es inferior a la atmosférica y en donde el vapor es transformado en agua. Las principales ventajas de trabajar con condensador son la mayor cantidad de energía extraída de cada kilogramo de vapor de agua y la mayor cantidad de trabajo mecánico que puede producirse con una máquina o turbina de tamaño determinado. Como líquido refrigerante se suelen utilizar aguas superficiales de ríos, lagos y mar. Esta última es la más empleada, siendo prueba de ello el elevado número de centrales térmicas instaladas en litorales marinos.

La mayoría de las paradas no rutinarias que se producen en las centrales térmicas están ligadas a problemas de corrosión metálica en las calderas y en los intercambiadores de calor. Ello origina un aumento en los gastos de mantenimiento y reparación, reemplazamiento total o parcial de componentes, menor rendimiento térmico, excesiva precaución en los diseños, riesgo para los operarios, etcétera.

En el caso de centrales térmicas refrigeradas por agua de mar, la incidencia de la corrosión es mayor. Por su proximidad al litoral, las instalaciones están expuestas a la corrosión atmosférica, además de la corrosión en estructuras sumergidas y en los circuitos de refrigeración, derivada de las propiedades específicas del agua de mar.

Empecemos por la *corrosión atmosférica*. La acción agresiva del medio depende de diversas variables: temperatura, humedad relativa, precipitaciones (tiempo y cantidad de lluvia), viento (dirección y velocidad), niebla, insolación (tiempo e intensidad) y concentración de especies agresivas (cloruro procedente del mar y dióxido de azufre procedente de la combustión en las calderas de carbón o de fuel).

La temperatura tiene que ver con el clima (tropical, templado o ártico) y el lugar donde está instalada la central. La humedad junto al mar es en general alta; siempre que la temperatura sea superior a cero grados centígrados, hay humectación (película de agua sobre la superficie del



Esquema de una central térmica de vapor con condensador refrigerada por agua de mar

FACTOR	EFECTO
CONDUCTIVIDAD	La conductividad del agua de mar es muy alta, lo que permite que los cátodos y ánodos de las pilas de corrosión operen a grandes distancias. La probabilidad de que se produzca corrosión aumenta y el ataque es mucho mayor del que se produciría en agua dulce.
TEMPERATURA	Al subir la temperatura, crece el riesgo de corrosión por picado, aunque, en ausencia de depósitos, la disminución de la concentración de oxígeno puede conducir a la formación de películas protectoras.
VELOCIDAD Y SEDIMENTOS EN SUSPENSION	La velocidad de corrosión aumenta en régimen de flujo turbulento. El agua de mar en movimiento puede destruir capas de óxido, con el incremento consiguiente de la concentración de oxígeno sobre el metal; se promueve una penetración rápida provocando la corrosión por cavitación. Cuando en el medio hay, además, arena y sedimentos en suspensión fluyendo a gran velocidad se produce la corrosión por erosión de las superficies metálicas por ruptura mecánica de las capas pasivas.
OXIGENO	En medios próximos a la neutralidad, la corrosión metálica suele estar controlada por la reacción catódica de reducción del oxígeno: altos contenidos de oxígeno aumentan la corrosividad del medio. Si una parte de una estructura está en contacto con una mayor concentración de oxígeno, se producen pilas de corrosión por aireación diferencial.
IONES CLORURO	El ion cloruro es altamente corrosivo para los metales férreos y aleaciones de base cobre. En el caso de los aceros al carbono y los metales férreos comunes, impide la pasividad y, en el de los latones y bronces, induce la corrosión por picado.
IONES SULFURO	Los iones sulfuro, presentes en agua de mar polucionada, aceleran los procesos de corrosión al potenciar el efecto de los iones cloruro. El bajo contenido en oxígeno de las aguas polucionadas posibilita el desarrollo de bacterias reductoras del sulfato; estas bacterias, generalmente anaerobias, reducen, a través de su metabolismo, los sulfatos disueltos en el agua de mar a sulfuros, que pasan al medio y favorecen los procesos de corrosión.
ENSUCIAMIENTO	Organismos y microorganismos pueden depositarse sobre las superficies metálicas creando zonas donde se favorece la anaerobiosis y la concentración de especies agresivas, dando lugar a la formación de pilas de aireación diferencial con el medio circundante aireado. También es frecuente la aparición de corrosión bajo rendijas debido a la formación de depósitos inorgánicos, como carbonatos, silicatos, etcétera.

Principales factores que inciden en la corrosión de metales y aleaciones sometidos a la acción de un ambiente marino y los efectos que producen

metal) y, por tanto, posibilidad de corrosión electroquímica. Las centrales refrigeradas por agua de mar están instaladas en la atmósfera más corrosiva, la del tipo industrial-marina, y por consiguiente sometidas a alto riesgo de corrosión atmosférica.

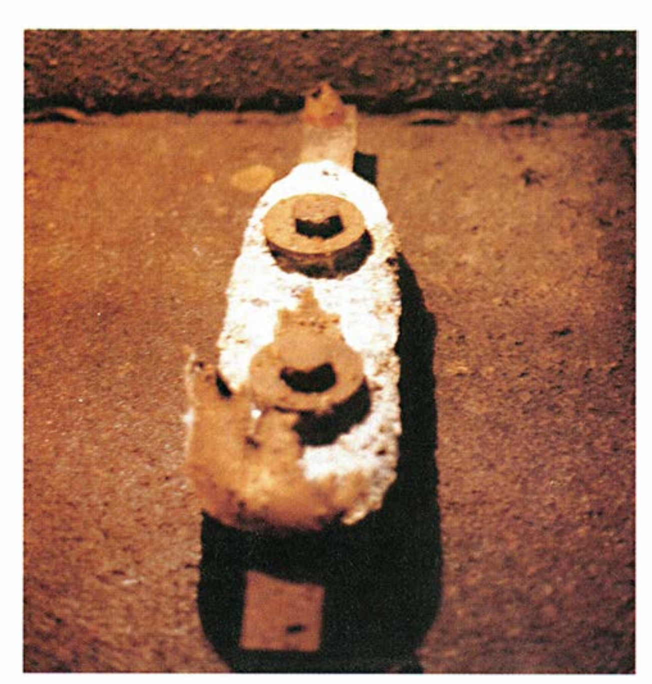
Por lo que respecta a la *corrosión de estructuras sumergidas en agua de mar*, conviene saber que aquéllas suelen ser de hormigón armado y acero. Cuando a través de los poros del hormigón penetran iones cloruro, se desencadena la corrosión de las armaduras con una triple consecuencia: (*a*) el acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido, (*b*) el hormigón puede fisurarse o desintegrarse por culpa de las presiones que se ejercen al generarse el óxido, y (*c*) desaparece la adherencia armadura-hormigón.

Las estructuras de acero inmersas en agua de mar y sometidas a la acción de las mareas y del oleaje tienen una franja que, de forma alternativa, está expuesta a la acción del mar (con alta concentración de iones cloruro y elevada conductividad) y del aire (máxima concentración de oxígeno), creándose pilas de aireación diferencial que dan como resultado un fuerte ataque corrosivo.

Debido a su incidencia directa en el proceso industrial, la *corrosión en el circuito de refrigeración* resulta crítica. El recorrido que sigue el agua de refrigeración comienza en una toma conectada a una bomba que la impulsa a través de una conducción hacia el condensador; en éste se produce la condensación del vapor que viene de la turbina a costa del calentamiento del agua de mar que sale por otra conducción hacia el emisario submarino, o canal de desagüe. El condensador consta de dos cajas de aguas por donde el agua entra y sale, en régimen turbulento, y un haz de tubos en los cuales se produce la transferencia de calor, sujetados a las cajas de aguas por bocas mandriladas (deformadas mecánicamente con una barrena). Las cajas de aguas se construyen de hierro fundido (aleación de hierro y carbono que contiene entre 1,7 y 6,3 % de este último y, en ocasiones, cantidades variables de otros elementos); muchas veces se recubre de ebonita u otros materiales protectores. Los tubos del intercambiador de calor suelen ser de latón (al aluminio o almirante); a veces se utiliza bronce o cuproniquel. La velocidad máxima de fluido en el interior de los tubos depende de la naturaleza del material, pero en general se acepta que no debe superar los 3 metros por segundo.

Las cajas de aguas están sometidas a la acción de un medio muy agresivo (alta concentración de iones cloruro, oxígeno, organismos, sedimentos y arena en suspensión) que pueden ocasionar roturas en ciertos puntos de la ebonita creando rendijas y provocando grafitización (formación de una capa no protectora de carbono por disolución selectiva del hierro) con el correspondiente deterioro de las propiedades metálicas.

En los tubos de latón, los problemas de corrosión están relacionados, fundamentalmente, con la erosión



Anclaje de un ánodo de sacrificio de aluminio-indio a la caja de aguas. El grafitizado puede llegar a causar tal deterioro en las propiedades metálicas del acero, que impide la reposición de ánodos al no poderse soldar

causada por la arena en suspensión y la formación de picaduras. Trabajos muy recientes han puesto de manifiesto que, en presencia de una elevada concentración de cloruros, los latones sufren corrosión por picado como consecuencia de la formación de micropilas de aireación diferencial constituidas por cátodos aireados y de ánodos desaireados situados bajo depósitos de productos de corrosión u orgánicos.

El problema puede verse agravado por la presencia de depósitos oxidantes, por ejemplo, los óxidos de hierro provenientes de la corrosión de las cajas de aguas o de conducciones de acero anteriores al condensador. En ciertas zonas del interior de los condensadores, donde la anaerobiosis es posible, se desarrollan habitualmente bacterias reductoras de sulfatos y generadoras de iones sulfuro. También es común la obstrucción de tubos por impedimentos físicos (piedras, moluscos y otros), produciéndose zonas estancas en el interior de los mismos que favorecen la concentración de especies promotoras de corrosión localizada. Tras la parada, y como consecuencia de un mal purgado en la operación de puesta en marcha, pueden quedar burbujas de aire que impidan el llenado completo en los tubos situados en la parte superior del condensador, creándose una situación de aireación diferencial que da como resultado un fuerte ataque corrosivo con formación de numerosas picaduras a lo largo de los tubos.

Cuando la magnitud de la corrosión localizada es tal que atraviesa los tubos del condensador, se verifica una mezcla entre el agua de mar de refrigeración y el agua desionizada de calderas formada por la condensación del vapor proveniente de la turbina. Esto hace que la alimentación de la caldera sea con un agua salina y aparezca el riesgo de reventones en los tubos donde se genera el vapor. Con esto, el efecto de la corrosión se transmite del circuito de refrigeración al circuito de vapor.

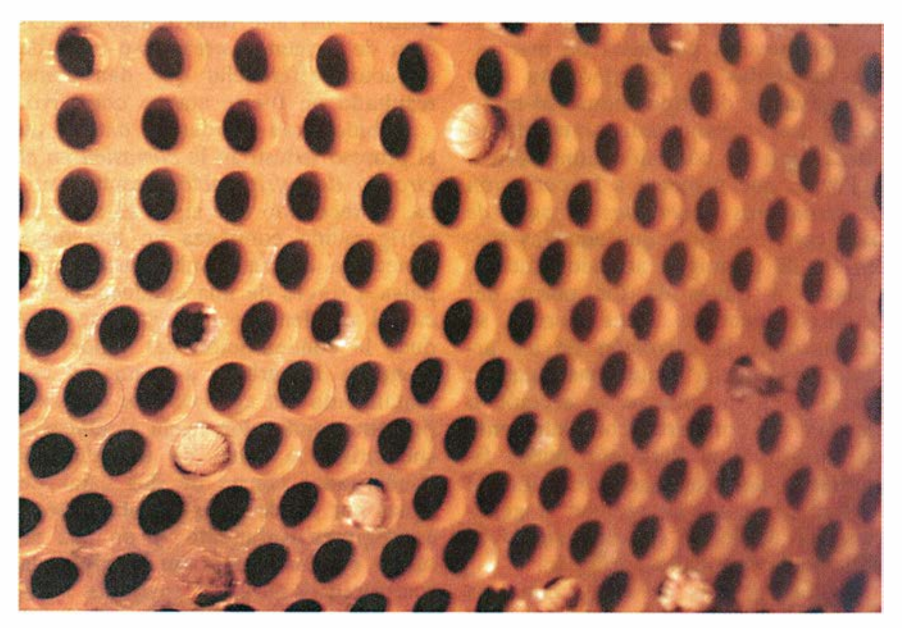
En las bombas que participan en el circuito de refrigeración, la corrosión se da por cavitación en los elementos que giran a gran velocidad en contacto con el agua de mar. Pueden presentarse también problemas de erosión de forma simultánea cuando hay sólidos en suspensión.

El control de la corrosión adquiere particular interés a la hora de minimizar sus efectos. En el caso de una central térmica refrigerada con agua de mar, para su correcta ubicación, debe disponerse de datos de corrosión atmosférica basados en pruebas a tiempo real (mapas de corrosión) y de las características del agua de mar: temperatura, *p*H, salinidad, concentración de oxígeno, capacidad de producir incrustaciones químicas, sedimentos y arena en suspensión, características microbiológicas, etcétera.

En la elección de materiales son importantes las experiencias con técnicas electroquímicas aceleradas que permiten, con buena aproximación, conocer el comportamiento de un metal o aleación en un medio determinado.

A propósito de los condensadores, se precisa controlar la temperatura de operación para evitar recalentamientos, amén de realizar periódicos análisis microbiológicos de las aguas para, si la población bacteriana ascendiera a niveles muy altos, proceder a su tratamiento con algún biocida.

Por lo que respecta a la prevención de la corrosión, las cajas de aguas suelen disponer de protección catódica por ánodos de sacrificio o por corrientes impresas. Aprovechando las paradas rutinarias, se acostumbra controlar el estado de los ánodos de sacrificio y dispersores, eliminando los depósitos formados sobre ellos y comprobando que hay continuidad eléctrica entre los electrodos y la caja de aguas. Conviene examinar el estado de la capa de ebonita y eliminar regularmente los depósitos inorgánicos y orgánicos (mejillones, erizos, lapas, etcétera), a fin de minimizar la posibilidad de corrosión en rendijas y evitar obstrucciones en los tubos del condensador.

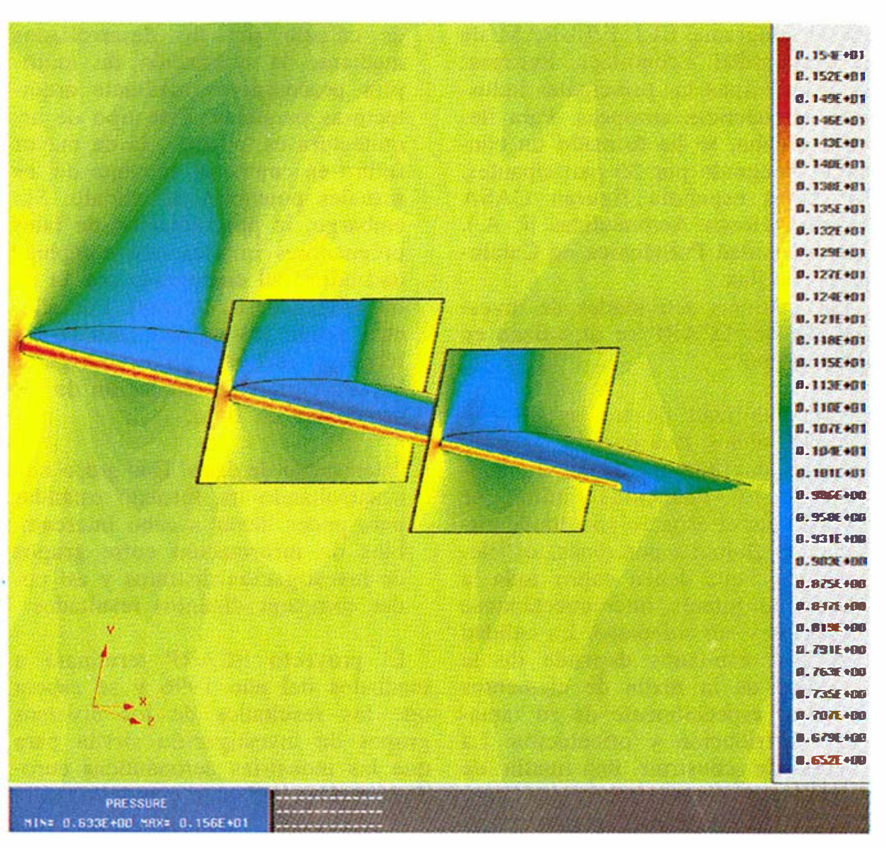


Entrada de los tubos del condensador. La fotografía está tomada con anterioridad a la limpieza física y en ella puede verse erizos y depósitos taponando algunos tubos, lo que no sólo hace disminuir la eficiencia térmica sino que puede crear también problemas de aireación diferencial

El efecto protector de los ánodos de sacrificio y las corrientes impresas se extiende a las bocas mandriladas de las entradas y salidas de los tubos del condensador. Protección imprescindible, ya que, al tratarse de superficies muy trabajadas mecánicamente y expuestas a un régimen turbulento, son especialmente susceptibles a la corrosión. El resto del tubo no puede ser protegido ya que, por constituir un circuito abierto, que vierte el fluido al mar, no es rentable la adición de inhibidores de la corrosión.

Con el fin de mantener el rendimiento térmico de los tubos del condensador, deberemos ser exigentes en su limpieza. En operación se suele utilizar el sistema "taproge", consistente en bolas deformables del mismo diámetro de los tubos, recubiertas a veces de un material abrasivo, que, añadidas al circuito de refrigeración, eliminan depósitos y bioensuciamiento. Regularmente se procede a la limpieza física de los tubos con balas de plástico que entran en los mismos a pistón y que recorren el tubo impulsadas por agua a presión. La limpieza física con balas no metálicas apenas si influye en la corrosión. No ocurre así con las limpiezas químicas, fundamentalmente las ácidas; al no eliminar éstas la totalidad de los depósitos y al quedar restos ácidos en las rendijas, pueden crear heterogeneidades en el interior de los tubos y originar problemas de corrosión por picado en la puesta en marcha del sistema.

J. MORALES, P. ESPARZA,
M. E. BORGES Y S. GONZÁLEZ,
Universidad de la Laguna



Distribución de presiones obtenida alrededor de un ala de avión

Investigación aerodinámica

El proyecto ECARP

La fuerte competencia que existe en todos los campos industriales hace que cualquier empresa disponga de intervalos de tiempo cada vez más cortos para desarrollar nuevos productos. Las industrias aeronáuticas, que no son ajenas a ese fenómeno, sienten también el apremio de diseñar y fabricar cada nuevo modelo de avión con la mayor rapidez posible.

Para diseñar un componente aeronáutico, es preciso conocer cuál va a ser su comportamiento aerodinámico. Antes de proceder a la construcción de un prototipo, se debe estudiar el comportamiento de distintos diseños alternativos para escoger el más apropiado.

Los análisis del comportamiento de un diseño aeronáutico se han venido realizando en los túneles de viento. Se construyen modelos a escala que se introducen en el interior de los túneles, donde se simula su comportamiento en condiciones parecidas a las reales. Ahora bien, el hecho de que los análisis se realicen con modelos a escala reducida determina que no siempre puedan extrapolarse los resultados a las configuraciones reales. Por otro lado, los análisis en túneles son muy caros debido a la especialización de estas instalaciones y al alto coste que representa la construcción de cada modelo a escala. Lo que en consecuencia limita el número de diseños a experimentar.

El fuerte incremento que la potencia de cálculo de los grandes ordenadores ha conocido en los últimos años ha posibilitado que los análisis por ordenador del comportamiento aerodinámico de diseños completos se hayan convertido en una alternativa económica a los túneles de viento. Podemos analizar configuraciones completas en ciertas condiciones, aunque sólo cabe esperar óptimos resultados a un coste competitivo si se dispone de infraestructura informática avanzada.

Los métodos de cálculo utilizados para dichos análisis están basados en técnicas de discretización de las ecuaciones de flujo. Discretización que puede acometerse mediante diferencias finitas, volúmenes finitos o elementos finitos, siendo estos últimos los más versátiles y potentes.

En función de la complejidad del flujo aerodinámico que se desee analizar, recurriremos a distintos tipos de ecuaciones. Si los efectos de la viscosidad del fluido (en este caso aire) no son importantes para el análisis, nos valen las ecuaciones de Euler; en caso contrario, se utilizarán las ecuaciones de Navier-Stokes. La resolución de ambos tipos de ecuaciones para casos reales presenta una gran complejidad numérica y un alto coste computacional. Esa es la razón de que estos tipos de análisis se hallen todavía en fase de investigación, aunque las industrias disponen de programas capaces de resolver las ecuaciones de Euler para configuraciones reales.

El análisis de algunos fenómenos, así la turbulencia o el flujo inestable, está también en una etapa inicial, con escasa implantación en la industria.

El ECARP (acrónimo de "European Computational Aerodynamics Research Project") es un proyecto de investigación europeo que se propone mejorar las actuales técnicas numéricas para el análisis de flujos aerodinámicos, al objeto de que puedan emplearse en la industria aeronáutica. Este proyecto está cofinanciado

por el programa BRITE/EURAM de la Comunidad Económica Europea; en él participan las principales industrias aeronáuticas europeas. Para llevarlo a cabo, se ha formado un consorcio integrado por 36 participantes. Por parte española figuran CASA (Construcciones Aeronáuticas S. A.), la Universidad Politécnica de Cataluña y Parallax.

Las distintas actividades de investigación del ECARP se organizan en cinco grupos:

1. Adaptabilidad de mallas de elementos finitos. Para resolver las ecuaciones de flujo mediante el método de los elementos finitos, se subdivide el espacio por donde circula el flujo en porciones, o "elementos", que deben cubrir toda la zona de interés interconectándose entre sí y sin solaparse. La calidad de los resultados depende de la calidad de la malla de elementos finitos, especialmente de su tamaño, distribución y orientación. La labor de construir una malla de elementos finitos sobre una geometría tridimensional puede revestir mayor complejidad que el propio análisis, máxime si además se pretende controlar la precisión de los resultados. En este grupo de trabajo se desarrollan diversas técnicas para construir mallas de elementos finitos que garanticen buenos resultados mediante su adaptabilidad a las características de cada flujo aerodinámico.

2. Validación de programas de flujo. Dada la gran diversidad de métodos distintos existentes para el análisis de las ecuaciones de flujo, este grupo de trabajo los compara para unificar los resultados de cada tipo de análisis. Los resultados provinientes de los diversos análisis se comparan también con resultados experimentales para comprobar la calidad de las técnicas numéricas empleadas.

3. Diseño óptimo. Corresponde a este grupo desarrollar técnicas que permitan no sólo analizar el comportamiento aerodinámico de un diseño, sino también optimizar su forma en función de ciertos criterios. Estas técnicas constituyen un paso más en la utilización de las herramientas numéricas, puesto que permiten mejorar, de forma automática, las geometrías de los diseños que se toman como punto de partida.

4. Confección de códigos en ordenadores paralelos. En la actualidad, los ordenadores con mayor potencia de cálculo son los desarrollados mediante la utilización de múltiples procesadores mediante arquitecturas paralelas. Este tipo de arquitectura es, además, la de mayor futuro en cuanto al aumento de las actuales potencias de cálculo. Sin embargo, la programación de tales ordenadores implica una complejidad adicional comparada con la de un ordenador tradicional. Por ello, este grupo de trabajo estudia las técnicas idóneas para configurar los algoritmos de resolución de los problemas de flujo.

5. Intercambio de datos. Este grupo está desarrollando un formato estándar para poder llevar a cabo intercambios de información entre grupos de investigación distintos y así poder comparar distintos resultados.

El proyecto ECARP terminará a mediados del año 1996 y se espera que los resultados de los diversos grupos de investigación sirvan para que las industrias aeronáuticas europeas puedan ser más competitivas.

G. BUGEDA Y E. OÑATE,
Universidad Politécnica de Cataluña

Ciberespacio

La batalla del consumidor

Para los ingenieros que diseñan las grandes vías de comunicación digitales, una nube es el símbolo que representa a las redes interconectadas y muy extendidas, como Internet. Es una metáfora adecuada por muchos conceptos: se están congregando redes globales tras uno de esos frentes nubosos todavía en formación, un frente que promete libertarnos de la tiranía de la información a pesar de que amenaza inundarnos con ella. Mientras las empresas de entretenimientos, de informática y de telecomunicaciones se apresuran a crear primero y dominar después este nuevo medio de repartir y vender información, buscan a tientas los dispositivos y formas de utilización que puedan llevar clientes hasta sus nubes.

Entretanto, aquí en tierra, los programadores y proyectistas de toda clase de artilugios electrónicos se esfuerzan para convertir en realidades tales sueños. Han inventado un fantástico muestrario de artilugios y programas que irán saliendo al mercado a lo largo de este año y del próximo. El *Newton* de Apple y el *Personal Communicator* de AT&T/EO, presentados el año pasado, fueron poco más que un primer borrador. IBM, Mitsubishi y BellSouth están dando los últimos toques a una combinación de teléfono móvil, fax y módem, provista de un ordenador en el asa y de menos de medio kilo de peso. Motorola saca inmediatamente al mercado el primero de una familia de ordenadores de mano, provistos de fax inalámbrico, apto para sistemas de mensajería y con capacidad para correo electrónico. Sony, Philips y Matsushita ofrecerán equipos similares.

Los comunicadores de mano son tan sólo uno de los ganchos. Pronto llegará a los televisores una avalancha de servicios de información y entretenimiento, que fluirán a través de las líneas de teléfono y de televisión por cable que ya penetran en los hogares. Esta "televisión interactiva" podría suponerle un filón para las compañías fabricantes de descodificadores capaces de enviar, "corriente arriba", mensajes de los espectadores.

Al principio, los servicios de televisión interactiva tratarán de competir en mercados ya establecidos, para atender una demanda de existencia probada. *TV Guide* y Tele-Communications, Inc. (TCI) están a punto de lanzar una versión en teletexto de la revista que semanalmente envían a 40 millones de hogares. Además de facilitar toda la información típica de las guías impresas (salvo la publicidad), *TV Guide On Screen* permitirá a los padres bloquear automáticamente la recepción de ciertos programas en función de la calificación que reciban por su violencia, vocabulario o exhibición de desnudos.

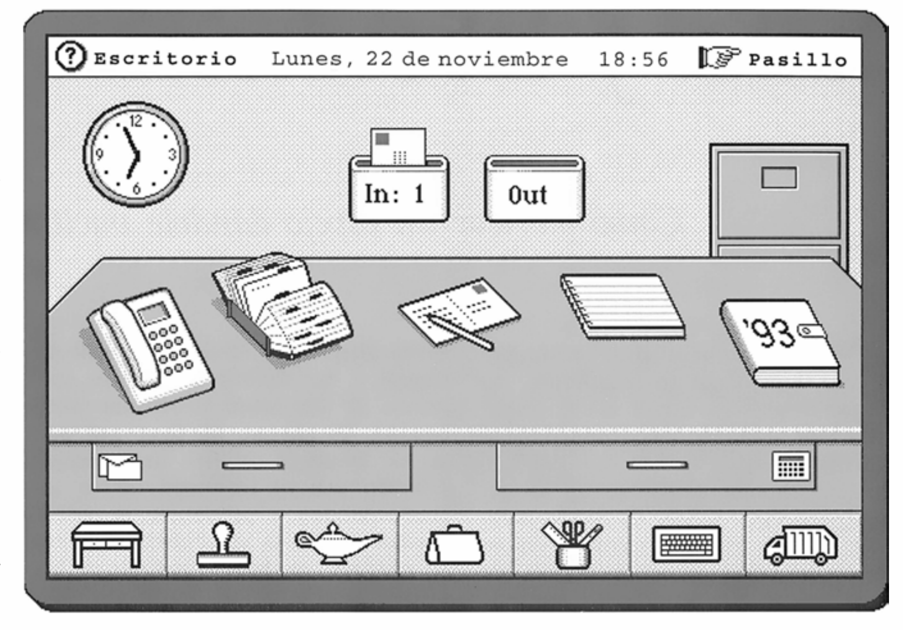
Varios otros sistemas de televisión interactiva facilitarán películas bajo demanda, con la esperanza de sacar partido del mercado de alquiler de vídeo que mueve billones de pesetas. No todos se valdrán de enlaces por cable.

Las guías de programación televisiva, el alquiler de películas y los canales de compras electrónicas suponen solamente los primeros pasos de una estrategia encaminada a que una nueva industria alce el vuelo halando de los cordones de sus propias botas. "Casi todos los medios nuevos arrancan de una recapitulación de los antiguos", señala Nathan P. Myhrvold, de Microsoft (compañía que posee sus soportes lógicos propios para televisión interactiva). "Más adelante empiezan a hacer lo bueno de verdad."

La opinión de Myhrvold es tan común como válida. El competidor que logra establecer la tecnología dominante vence. Todos los contrincantes buscan construir el muelle al que habrán de atracar las flotas de transporte de información videográfi-

ca y servicios de entretenimiento no botadas todavía. Desde el primer momento, Bell Atlantic proyectó su StarGazer con la intención de que fuera un sistema abierto a nuevos servicios. En su papel de transportista o portador común, ha de ofrecer "línea" de vídeo a toda compañía que lo solicite. Cuando el sistema haya quedado terminado —lo que seguramente no ocurrirá hasta 1996— los usuarios podrán guiar sus aparatos de televisión a través de una galería comercial "virtual".

"Consumimos mucho tiempo con los medios de comunicación, pero aún dedicamos más tiempo a comunicarnos entre nosotros", señala Myhrvold, aludiendo a otro de los cebos con que la industria piensa incitar a los consumidores a entrar en la red. Motorola ha traducido ya en un récord de beneficios el aumento del cuatrocientos por ciento en transmisiones de mensajería que se ha producido desde 1985, plazo en el que el número de abonados a la telefonía móvil se ha multiplicado por veinte.



Los ordenadores de mano han de ser más "amables con el usuario" para que el ciberespacio baje a tierra. La interfaz de usuario de General Magic da a las aplicaciones un aspecto más familiar

A los ejecutivos de las compañías informáticas, que han de encarar la conversión de sus productos en mercancías, la senda les parece clara: hay que producir dispositivos de comunicación computarizados y de mano, dotados de una programación que los haga realmente útiles. El Newton de Apple, diseñado para que hiciese de "ayudante digital", recibió una acogida gélida en la prensa del ramo; fue criticado por no prestar suficiente atención a las comunicaciones. Mientras Apple se repone, otras dos visiones, la del gigante Microsoft una, y la otra de la pequeña y recién nacida General Magic, de Silicon Valley, probablemente se alcen como máximas contendientes en lo que promete ser una lucha bastante agitada.

En las empresas, casi todos opinan que los equipos de mano no podrán captar el interés y el dinero del mercado de masas si no resultan mucho más fáciles de utilizar que los ordenadores personales de mesa. Casi todos, salvo Myhrvold. "Estamos habituados a que bienes de consumo increíblemente populares sean muy molestos de usar," argumenta. "Supongamos que queremos ir al cine. Hay que hacer cola; la película empieza tanto si estás como si no, y la entrada es cara. Vamos a verla porque nos hace reír o llorar, no porque sea cómodo ir a verla. La clave está en conseguir que la razón entre lo apetecible que resulta una cosa y la dificultad de usarla sea mayor que uno."

La idea que Microsoft tiene de apetecible empieza en el lugar de trabajo, y por eso la compañía ha dado a su nueva plataforma el nombre de Microsoft en el trabajo. "Hemos creído que lo mejor es poner nuestra programación en los equipos de fax, en las fotocopiadoras y en los teléfonos, y todo ello de modo que se integre con su ordenador personal", explica Myhrvold. El sistema At Work se encuentra también en el alma de WinPad, un sistema operativo que Microsoft está diseñando para que funcione en equipos construidos por Compaq y Motorola.

General Magic quisiera que tal evolución se pareciese más a una revolución y ha decidido ir directamente al consumidor. Sin el respaldo de Microsoft, y no siendo un goliat de la informática, puede parecer poco verosímil que General Magic llegue a ser un david. Pero todo un tropel de hermanos mayores —Apple, AT&T, Matsushita, Motorola, Philips y Sony— ha invertido en la compañía y dispone de licencia para usar su tecnología.

General Magic confía en poder seducir tanto a los consumidores como a los aficionados a los chismes electrónicos haciendo que su sistema operativo, llamado Magic Cap ("Gorro mágico"), se oriente mucho más hacia las comunicaciones y sea mucho más fácil de usar que el de sus competidores.

En un Macintosh, sea por caso, las carpetas se encuentran en un plano llamado escritorio; al abrir una, aparece una ventana que contiene archivos, mezclando así dos metáforas. Siempre que es posible, Magic Cap procura emular el aspecto de las cosas del mundo real. El escritorio tiene el aspecto de una verdadera mesa de oficina, sobre la cual descansan un teléfono, un fichero rotativo, un bloque de notas y otros elementos cuya función es precisamente la que sería de esperar. Podemos salir del despacho y deambular por un pasillo, y abrir en él las puertas que conducen a otras aplicaciones. Podemos incluso salir del edificio y bajar por una calle en la que se encuentran diversos edificios, que representan cada uno un servicio de información.

Lograr que el correo electrónico se parezca más al normal plantea una dificultad mayor. Para casi todo el mundo, correo electrónico significa texto y nada más. Por ello, General Magic se propone, humildemente, cambiar el mundo. Ha desarrollado un lenguaje de programación interpretado, el Telescript, que permite que un mensaje contenga imágenes, sonidos e incluso instrucciones sobre cómo debe actuar. Un mensaje podría, por ejemplo, encargarse de reservar billete para un vuelo y mantenerse atento a posibles incidencias, notificando al usuario los cambios que puedan producirse. Magic Cap lleva el Telescript incorporado, y todos los dispositivos Magic Cap (el primero de los cuales es el producto de Motorola) vendrán dotados del MagicMail de AT&T. Pero ésta es la única red que hasta ahora dispone de licencia para usar Telescript.

W. WAYT GIBBS

Taller y laboratorio

Mark Dragovan y Don Alvarez

Cómo fabricar un espejo dándole vueltas a un líquido

Cuando se hace girar un líquido dentro de un recipiente, su superficie no se queda plana, sino que adquiere una forma cóncava, parabólica. Sabido es también que los espejos primarios de los telescopios ópticos son de forma parabólica, pues ese perfil enfoca en un punto los rayos de luz paralelos que les lleguen. Se ha aprovechado esta característica de los líquidos en rotación para construir espejos telescópicos de gran tamaño con metales líquidos, principalmente mercurio. En estos telescopios la forma parabólica del espejo se mantiene mientras el líquido no deje de girar. Se ha demostrado que la calidad óptica de los espejos líquidos de mercurio se aproxima a la de sus semejantes de vidrio pulido, a la vez que ofrecen la ventaja de un peso y un precio menores.

Una variante muy simple de este procedimiento, que podemos repetir en casa, consiste en emplear un líquido que se endurezca, de manera que la forma parabólica de su superficie se conserve una vez haya dejado de dar vueltas. Para ello nos vale perfectamente la epoxia; ésta, mezcla de resina y endurecedor, se solidifica lentamente con mínimos cambios de forma. Por lo que respecta a la calidad de imagen, los espejos así construidos no pueden competir con los de vidrio aluminizado; pero acaso resulten más adecuados como colectores de luz en el extremo infrarrojo y de microondas del espectro. Basándonos en este método, hemos construido, sin apenas gasto, un espejo del tamaño de una antena parabólica doméstica para observar la radiación cósmica de fondo de microondas.

El giradiscos de un sistema estéreo es un dispositivo ideal para poner un líquido a dar vueltas. Pero antes asegúrese de que retira la cápsula fonocaptora. El aparato no tiene por qué ser de la mejor calidad; hemos comprobado que el resultado no se resiente aunque se produzcan pequeñas variaciones en la velocidad del plato. A quienes se hayan pasado a los discos compactos no les será difícil hacerse con un giradiscos de segunda mano por poco dinero.

Para contener la epoxia vale cualquier recipiente, incluso un plato de mesa común, pero nosotros elegimos envases de polietileno o polipropileno de los que sirven para guardar alimentos. Estos recipientes de plástico son muy prácticos porque la epoxia se adhiere mal a su superficie y se saca fácilmente el espejo fraguado. Por otra parte, el recipiente debe tener una altura suficiente para que el líquido no rebose por los bordes durante la rotación. Su diámetro puede ser cualquiera que le permita rotar sin trabas en el giradiscos. No obstante, téngase en cuenta que la mayoría de los giradiscos no funcionan si el brazo no está sobre el borde del plato. Para dejar sitio al brazo, puede que debamos elegir un recipiente de un diámetro algo menor que el plato.

La mejor epoxia será la menos viscosa y de mayor tiempo de fraguado. (La viscosidad mide la fluidez o melosidad de un líquido.) El número de epoxias en el mercado es realmente asombroso, así que eche un vistazo en los anaqueles de "resinas" y "epoxias" de su ferretería habitual. Le bastará con un decilitro por espejo.

En cuanto al tiempo de fraguado, si se propone hacer espejos de diámetro superior a unos 30 centímetros le recomendamos que elija epoxias que tarden en fraguar uno o dos días. Conviene hacer los espejos de tamaños menores con epoxias que fragüen en no menos de cuatro o seis horas. No utilice epoxias que se sequen deprisa, epoxias "a los cinco minutos".

La epoxia se vende habitualmente en dos envases separados, uno para la resina y el otro para el endurecedor. Hay que mezclar las dos sustancias a conciencia para que resulte un líquido uniforme. Para establecer las proporciones adecuadas siga las instrucciones del paquete.

La epoxia no suele ser peligrosa, pero es recomendable tener un poco de cuidado. Los productos químicos que va a manejar son bastante desagradables; requieren el empleo de guantes y una buena ventilación. Además, puede que perciba que la epoxia despide un poco de calor, el que libera al fraguar. Si tiene la intención de construir varios espejos y desea preparar cantidades grandes, mezcle la epoxia en lotes de no más de un litro, y guárdelos por separado. No queda descartado que cargas mayores humeen o incluso que ardan. (A las epoxias rápidas es más fácil que les suceda, y ésta es una de las razones para evitarlas.)

Para determinar exactamente cuánta epoxia emplear, primero haga rotar un poco de agua dentro del recipiente. En éste vierta justo el líquido que haga falta para que lo moje pero sin que rebose durante la rotación. Cerciórese de que el recipiente está bien centrado en el plato del giradiscos y, si es necesario, ajuste la inclinación de éste para que el agua se reparta uniformemente por toda la superficie. Mida el volumen de agua que ha usado y prepare el mismo volumen de epoxia. No deje de secar bien el interior del recipiente antes de verter la mezcla, pues la humedad impide que muchas epoxias fragüen correctamente.

El giradiscos debe rotar hasta que la epoxia haya fraguado. Es importante emplear un "parabrisas", o sea, un envoltorio de plástico colocado sobre el líquido en rotación, ya que ésta puede levantar un poco de brisa capaz de producir ondulaciones en la superficie. Si aun así encontrase defectos en la epoxia ya seca, repita el procedimiento añadiendo otra capa. Hemos visto que dos capas finas producen una superficie más suave que una sola del mismo volumen.

Una vez fraguada, la epoxia presenta la rigidez de un trozo duro de

MARK DRAGOVAN y DON ALVAREZ trabajan en la Universidad de Princeton. En ésta, Dragovan recibió en 1989 un premio presidencial "Jóvenes Investigadores". Se dedica a la observación de anisotropías en la radiación cósmica de fondo de microondas. Alvarez, alumno de doctorado, disfruta de una subvención del Consejo de Investigación de la Universidad.



Espejo de epoxia creado dándole vueltas a una mezcla de resina y endurecedor contenida en un envase de plástico para alimentos. La rotación confiere al líquido una forma cóncava, parabólica. Una vez fraguada, la epoxia adquiere propiedades reflectoras por plateado químico. La velocidad del giradiscos determina la distancia focal: a mayor velocidad de giro, menor distancia focal

plástico acrílico. La distancia focal resulta proporcional al período de rotación. Así, una velocidad de giradiscos de 45 revoluciones por minuto produce una distancia focal de unos 22,1 centímetros, y una de 33 rpm, una distancia focal de 41,1 centímetros. Un recipiente de mucha masa puede hacer que la velocidad del giradiscos sea irregular, lo que afectaría a la distancia focal.

Para dotar a la superficie de la epoxia de cualidades reflectoras puede recurrir al plateado químico, técnica que han difundido mucho los aficionados a la construcción de telescopios. Puede enviar la epoxia endurecida a alguna casa que se dedique al plateado. Otra solución es que lo haga usted mismo. En tal caso tendría que adquirir los materiales necesarios, a ser posible con instrucciones detalladas. Al igual que la epoxia, esas sustancias son algo nocivas, por lo que recomendamos otra vez guantes y buena ventilación. El requisito concreto más importante para conseguir un buen plateado es una superficie limpia. Hágase con las instrucciones oportunas; necesitará además agua destilada y desmineralizada para el enjuague final.

Tenga en cuenta que algunas epoxias se platean con más facilidad que otras. Si con la primera que emplee no lo consigue, pruebe con otra. Por otra parte, si no quiere molestarse en platear, pruebe con cinta aluminizada; es muy reflectora y se aplica fácilmente.

Su parábola de epoxia plateada valdrá como espejo primario de un telescopio reflector newtoniano. Para conducir al exterior del tubo los rayos luminosos le hará falta un pequeño espejo secundario plano. Los espejos de epoxia forman unas imágenes aceptablemente buenas, si bien a un constructor aficionado de telescopios a duras penas le parecerán pasables. Funcionan mejor como colectores de rayos infrarrojos; con uno de tamaño mediano apuntado al Sol, un trozo de papel o de madera colocado en el foco arden al instante. Acoplándole al sistema una cámara infrarroja (*véase* "Infrarrojo en el cuarto de la plancha", por Donald G. Mooney; "Taller y laboratorio", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1992) o una cámara ordinaria provista de película infrarroja podrá captar imágenes de esas longitudes de onda.

La técnica de los espejos centrifugados se presta a diversas variaciones. Así, se puede crear un espejo parabólico "excéntrico" colocando el recipiente levemente desviado del centro del plato del giradiscos, con lo cual obtendrá un espejo sensible a la radiación de microondas. Además de la epoxia, hay otras sustancias —los oretanos, los acrílicos, los compuestos de siliconas— que también producen buenas superficies. Para variar la distancia focal, disminuya la velocidad del giradiscos o experimente con otros mecanismos rotativos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AMATEUR TELESCOPE MAKING. Cuarta edición. Albert G. Ingalls. Scientific American Publishing Company, 1935.

PROCEDURES IN EXPERIMENTAL PHYSICS. John D. Strong. Prentice-Hall, 1938.

OPTICAL SHOP TESTING. Dirigido por D. Malacara. John Wiley & Sons, 1992.

LARGE OFF-AXIS EPOXY PARABOLOIDS FOR MILLIMETRIC TELESCOPES AND OPTICAL LIGHT COLLECTORS. Donald L. Alvarez, Mark Dragovan y Giles Novak, en *Review of Scientific Instruments*, vol. 64, número 1, págs. 261-262; enero de 1993.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Topología de la prestidigitación

El juego consiste en asir una cuerda, tomando una punta con la mano izquierda y la otra con la derecha, y formar un nudo en ella sin soltar sus extremos.

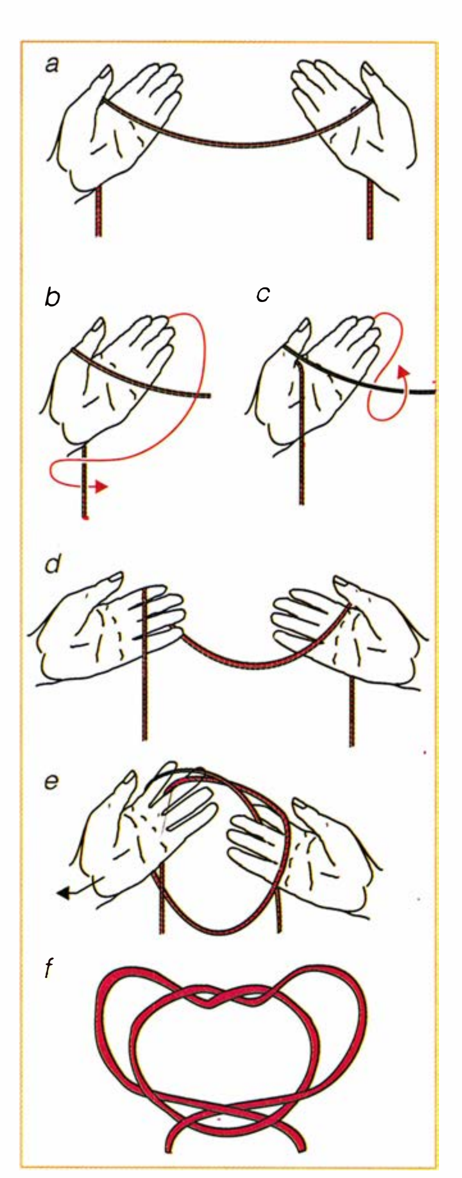
Nuestro cuerpo y la cuerda constituyen un bucle cerrado simple. Según un teorema topológico, no es posible crear un nudo por deformación continua de un bucle cerrado (que es precisamente lo que se espera que intentemos); el problema no podrá, pues, tener solución si asimos la cuerda de la forma "normal" habitual. Podemos, sin embargo, formar un nudo en los brazos. Y no es nada difícil: basta cruzarlos, como cuando teníamos que ser buenecitos en el cole, y asir los extremos de la cuerda sin descruzar los brazos. En cuanto lo hagamos, el nudo quedará transferido a la cuerda.

El nudo del novato

Este truco nos permite formar un nudo ante los mismísimos ojos de los espectadores. Pero al pedirles que lo hagan ellos, fracasarán sin remedio.

Procurémonos un cordón suave y flexible, más o menos de un par de metros de largo. Sostengámoslo sobre los huecos de los pulgares, haciéndolo pasar sobre las palmas, como en la figura 1*a*, manteniendo las manos separadas cosa de medio metro. Dejemos pender las dos largas puntas, para equilibrar el peso del trozo de cordel. Acerquemos ahora las manos lentamente, sin dejar de agitar los dedos de la mano derecha. El movimiento de los dedos en nada afecta a la realización del nudo; sólo sirve para distraer la atención de los espectadores de los movimientos que hace la mano izquierda, que son los importantes. Conviene que parezca que los movimientos de la derecha son útiles, indispensables y fascinantes.

Deslicemos el pulgar de la izquierda por debajo del cordón, sosteniéndolo enseguida como en la figura 1*b*. Hagamos después pivotar rápidamente los demás dedos, haciéndolos pasar por detrás del trozo de cuerda colgante (*flecha de la figura 1b*), hasta alcanzar la posición de la figura 1*c*. Sin detenernos, pasemos los dedos por debajo del trozo horizontal de cuerda (*flecha de la figura 1c*) y retiremos el pulgar. Si todo ha sido correctamente ejecutado, deberíamos haber alcanzado la posición de la figura 1*d*. Nos valdremos finalmente de las puntas de los dedos de cada mano para atrapar el extremo del cordón que pende de la otra mano, como muestra la figura 1*e*. Sosteniendo así la cuerda, separaremos las manos y haremos aparecer el hermoso nudo simétrico de la figura 1*f*. El nudo se deshace sin más que tirar de los extremos del cordón, pudiendo así anudarlo y desanudarlo indefinidamente.



1. Forma de anudar una cuerda

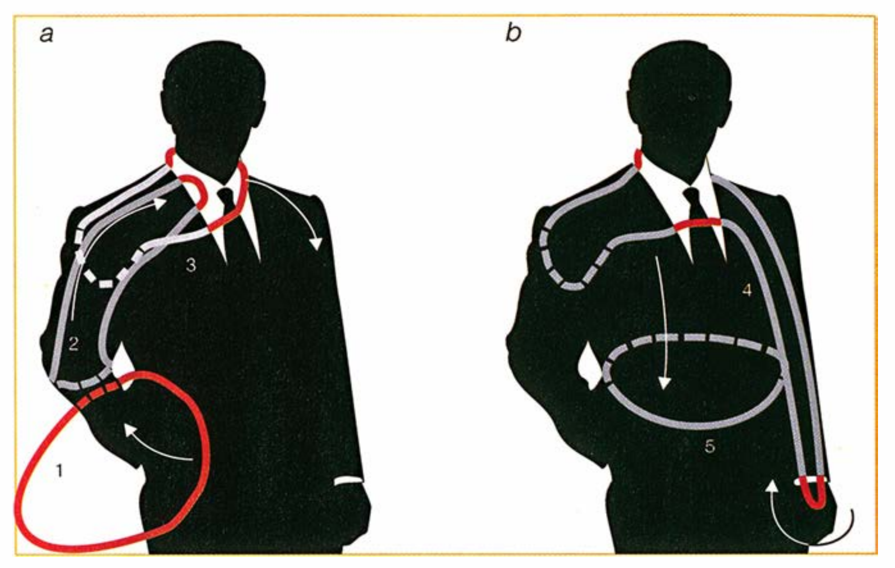
Nada en esta manga...

¿Cómo extraer un bucle de hilo que nos rodea el brazo sin sacar la mano del bolsillo? Tomemos un par de metros de cordel, cuyas puntas anudaremos, formando un bucle. Ahora nos ponemos la chaqueta, la abotonamos, y pasando el brazo por dentro del bucle nos metemos la mano en el bolsillo del costado, como indica la posición 1 en la figura 2*a*. El problema consiste en extraer el bucle sin sacar la mano del bolsillo (y sin hacer que el bucle se deslice hasta el bolsillo para escamotear la cuerda pasándola bajo las puntas de los dedos).

El fundamento topológico del método está en que nuestra chaqueta tiene orificios: el bucle no está realmente ligado al par cuerpo-chaqueta, sino que sólo lo parece. Para comprobarlo, imaginemos que nuestro cuerpo se encoge y reduce hasta el tamaño de un guisante, conservando la chaqueta su tamaño, de suerte que el cuerpo pueda deslizarse a lo largo de la manga y bajar hasta el interior del bolsillo. Una vez allí, es evidente que podemos desprendernos del bucle. El problema está en que las limitaciones que el mundo real impone hacen impracticable dicho método.

Comencemos por introducir una porción del bucle (posición 2) por la bocamanga, haciéndola subir a lo largo del brazo por el interior de la manga (*flecha de la figura 2a*). Tiremos de la cuerda hasta sacar un bucle por el cuello y pasémoslo por detrás de la cabeza (*posición 3 de la figura 2b*). Hagamos bajar el bucle a lo largo del otro brazo, por dentro de su manga, como indica la flecha (*posición 4*). Pasemos el doblez de cuerda por encima de esa mano y volvamos a pasarlo por la manga, hacia arriba esta vez.

Asamos el cordel al salir frente a la cabeza y empujémoslo hacia abajo, por dentro de la chaqueta. Las dos partes del bucle pasan a través de los agujeros de los brazos de la chaqueta y, tras algunas contorsiones, el cordel acaba en el suelo en torno a nuestros pies.



2. Procedimiento para liberar un bucle del brazo

Nada en la pernera del pantalón...

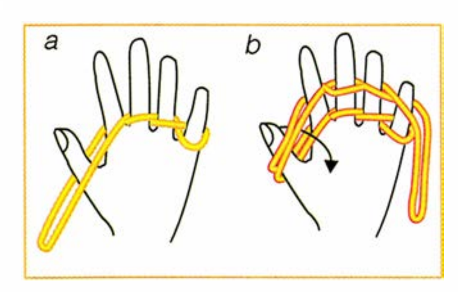
Cuando sus amigos sepan resolver este problema, pídale a uno de ellos que trate de hacer lo mismo, vestido igual que antes con chaqueta, pero esta vez con la mano metida en el bolsillo del pantalón. Si se realizan los movimientos antes explicados el bucle seguirá rodeándole la cintura y también el brazo. Para conseguir soltarse tendrá que añadir una serie de movimientos parecidos, pero esta vez en los pantalones: ha de hacer bajar un bucle por dentro de la pernera del lado contrario al de la mano que está en el bolsillo, hacerlo pasar por debajo del pie, subirlo por la pernera y, finalmente, retirar el cordel, haciéndolo bajar por dentro de la otra pernera. El proceso obliga a posturas no muy decorosas, cosa que suele divertir mucho a los espectadores...

Dedos rebanados

Hagamos pasar un bucle de cordel fino en torno a los dedos de una persona, de tal manera que, cuando tiremos del cordel, parezca que éste pasa a través de los dedos. Para entender el fundamento topológico de este truco, imaginemos que todos nuestros dedos están en contacto con una superficie dada, lo que impediría que el hilo se deslizase sobre las puntas de los dedos. El problema equivale a extraer el bucle de las aberturas limitadas por los dedos y la superficie. Si la cuerda estuviera realmente ligada a los dedos no podríamos conseguirlo; por eso lo importante es que lo parezca. Si por error quedase verdaderamente ligada, resultaría necesario que rebanase los dedos.

Realicemos un bucle con un metro de hilo fino. Rodeemos el dedo meñique de la mano izquierda, démosle un cruce, rodeemos el anular, crucemos en el mismo sentido, y continuemos de dedo en dedo hasta el pulgar (*figura 3a*). Volvamos ahora a recorrer los otros dedos, haciendo los cruces en orden inverso (*figura 3b*). Hemos de proceder con cuidado y asegurarnos de que los cruces se han realizado en sentido contrario en las pasadas de ida y vuelta.

Doblemos el pulgar hacia la palma de la mano, liberando el cordel. Tiremos enérgicamente de la porción de hilo que pende del dedo meñique... y podremos oír cómo va tajando los dedos sin causarles ¡milagro! el menor daño.



3. Así se rebanan los dedos

El nudo del manco

¿Cómo anudar un cordel con una sola mano? Este truco no entraña ningún teorema topológico notable, pero sí resulta espectacular cuando es realizado con movimientos rápidos y continuos.

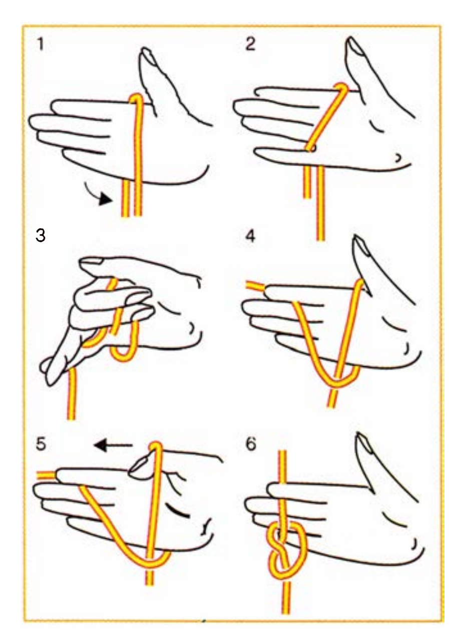
Dejemos colgar el hilo de la mano abierta, con la porción mayor sobre la palma, y operemos después según la secuencia de movimientos representados en la figura 4.

Nudos a granel

¿Cómo anudar simultáneamente docenas de nudos? Este truco ha de ir acompañado de un cuentecito, que se le va narrando al público mientras se realizan los movimientos que van a crear los nudos.

El rey Tajacasco III de Topólogis tenía una hija llamada Möbia, que se disputaban con ardor dos pretendientes: el maquiavélico Sir Klein de Both-Ella, noble ya entrado en años, y un herrero muy apuesto, llamado Guay del Paraguay. Para resolver el dilema, el rey anunció que concedería la mano de su hija a quien pudiera hacer en un minuto mayor número de nudos en un cordel.

Congregáronse las gentes en la plaza del mercado para presenciar la lid. A mediodía en punto, con precisión helvética, el Gran Chambelán hizo sonar un gong enorme y dio comienzo la prueba. Sir Klein de Both-Ella arrancó a un ritmo frenético, haciendo nudo tras nudo en su cordel, mientras que Guay se dedicaba a enrollar el hilo sobre su dedo pulgar, silboteando distraídamente para sí. La pobre Möbia estaba al borde del ataque

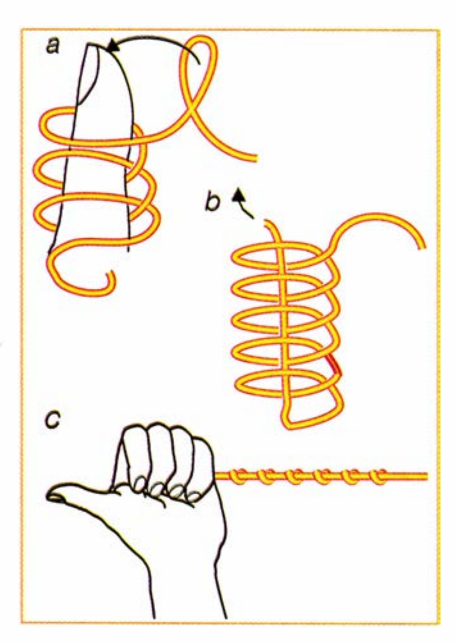


4. Forma de hacer un nudo con una sola mano

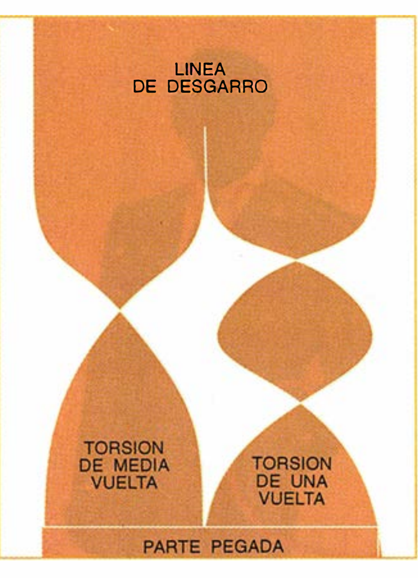
histérico, cada vez más nerviosa y agitada. ¡Cincuenta y un segundos!, cantó el chambelán. ¡Cincuenta y dos! Faltaban muy pocos segundos. Sir Klein había realizado 76 nudos y Guay... ni uno solo. Cuando el chambelán cantó cincuenta y cinco, el herrero extrajo los bucles que había ido devanando sobre el pulgar. A los cincuenta y seis segundos, Guay introdujo la punta libre del hilo por el interior de sus espiras. A la cuenta de cincuenta y siete, Guay empezó a tirar, suave pero firmemente, de la punta. En el segundo cincuenta y ocho el frenético Sir Klein empezó su nudo número 87. ¡Cincuenta y nueve!, cantó el chambelán mientras Sir Klein sonreía en dirección a Möbia, relamiéndose los labios de placer anticipado...

Fue en ese momento cuando Sir Klein se percató de que al tiempo que Guay iba tirando del hilo iban formándose nudos diminutos. Sonó el gong, marcando el final de la prueba. Sir Klein de Both-Ella había realizado 92 nudos, pero sobre el hilo de Guay se sucedían, a modo de minúsculas perlas en un collar, nada menos que un centenar de nuditos.

La treta consiste en arrollar las espiras que vemos representadas en la figura *5a*. Es preciso formar cada bucle antes de colocarlo en el pulgar. En cuanto hayamos realizado una docena (el centenar de nudos del cuento es pura licencia literaria) introduciremos la punta libre a través



5. El nudo repetido de Guay del Paraguay. (a) *Formamos espiras en torno a nuestro dedo;* (b) *hacemos una punta por dentro de las espiras, y* (c) *los nudos van apareciendo, como si fueran perlas menudas*



6. Preparación de la cinta de muselina roja

de las espiras (*figura 5b*). Hay que sujetar con firmeza las espiras con la mano izquierda, dejando que asome sólo la punta del hilo, e ir después tirando de ella con la derecha, suavemente y sin tirones. Los nudos se irán formando uno tras otro (*figura 5c*).

Esta técnica fue utilizada en tiempos por los bomberos para preparar rápidamente cuerdas de nudos por las que pudieran descolgarse las personas atrapadas en un incendio. Su interés topológico estriba en que podemos realizar así nudos ¡compuestos!, o sea, toda una serie de nudos sobre el mismo hilo, sin haberlos separado de antemano. Pensemos en la forma en que cada bucle va tirando del siguiente, formando un pequeño nudo llano. Vemos intervenir otro principio matemático importante, el principio de inducción. Si, después de haber formado un nudo cerrando una espira, la situación subsistente sigue siendo la misma que al principio, la operación puede repetirse tantas veces como espiras puedan formarse.

La cinta de muselina roja

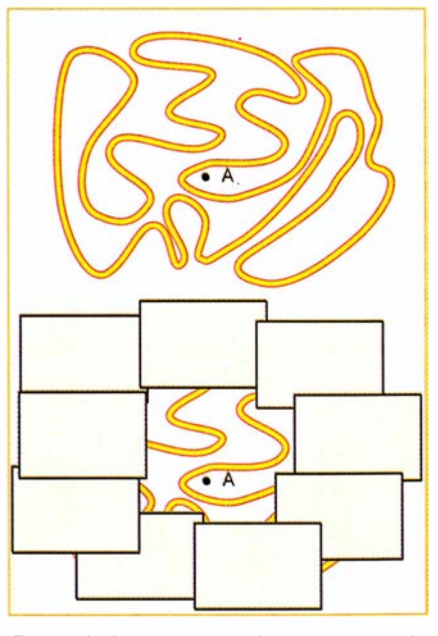
La banda de Möbius, que se construye formando un bucle con una tira de papel retorcida media vuelta y pegando sus extremos, es rica en propiedades topológicas de apariencia paradójica. Tiene tan sólo una cara (¡pruebe el lector a pintarla!) y, cuando la cortamos a lo largo de su línea media, se mantiene de una sola pieza. Se le puede sacar buen partido a esta curiosidad topológica para trucos de magia, aunque para ello conviene utilizar cintas o tiras de tela en lugar de papel.

En la forma más sencilla del truco se les entregan a dos voluntarios largas cintas de tela, ofreciendo un premio a quien consiga obtener dos aros separados. Uno de los voluntarios acaba con una sola banda; otro, con dos bandas que forman dos aros enlazados. El secreto es sencillo: la primera cinta es una banda de Möbius con una torsión de media vuelta; la segunda es análoga, pero su torsión es de una vuelta completa. Si son suficientemente largas, de cuatro o cinco metros, por ejemplo, los voluntarios no se fijarán en las torsiones.

James Wobensmith, aficionado al ilusionismo, propuso hace mucho una variante sorprendente, en un artículo titulado "El truco de la cinta de muselina roja" (*The Magic World*, septiembre de 1923). El truco comienza con una única banda, que el ilusionista corta en dos a lo largo de la línea mediana. Se les dan estas dos mitades a sendos voluntarios, que han de rasgarlas de igual forma, los cuales obtienen los mismos resultados que en el caso anterior. El secreto consiste en preparar la cinta como en la figura 6, con una de las bandas retorcida media vuelta y la otra, una vuelta completa, pegadas lado a lado.

Dedos prisioneros

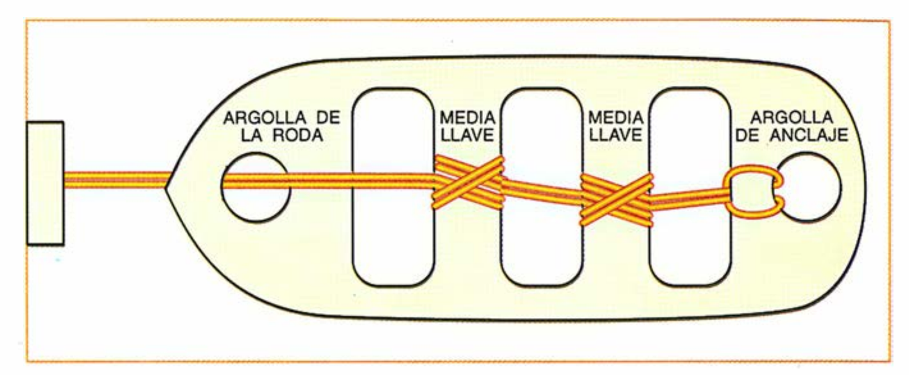
Se basa este truco en el teorema de Jordan. Se dice que una curva cerrada es simple si no se corta a sí misma. El teorema de la curva de Jordan enuncia que toda curva cerrada simple divide al plano en dos



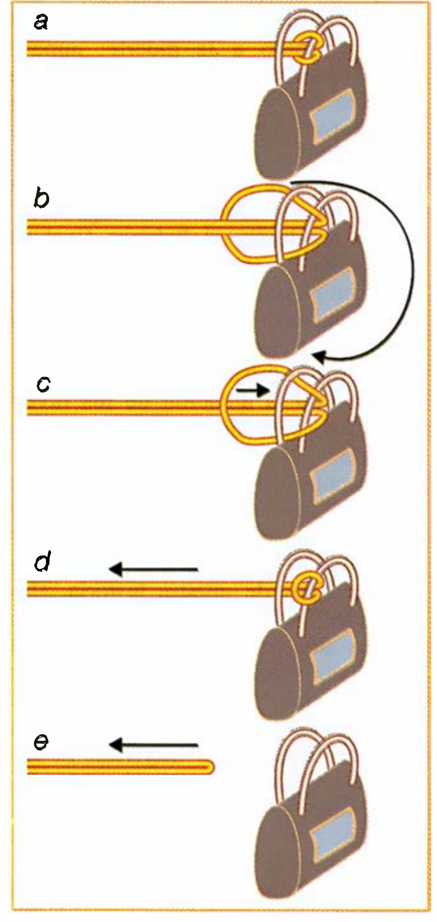
7. El dedo aprisionado: (a) *antes de la colocación de los periódicos y,* (b), *después*

regiones, una exterior y otra interior. El teorema puede parecer evidente, pero una primera tentativa de demostración de Camille Jordan (1838-1922) resultó a la vez complicada y errónea. La primera demostración correcta ocupó alrededor de un centenar de páginas.

Tomemos un cordel de unos seis metros de largo y anudemos sus extremidades. Roguémosle a un voluntario que lo coloque sobre la alfombra, dándole una forma complicada (*figura 7*), pero sin superposiciones. Un segundo voluntario va colocando hojas de periódico con el fin de recubrir el total, exceptuada una pequeña porción rectangular en el centro (*7b*).



9. Modelo en cartón para ¡El pirata y la chalupa! Se resuelve como en la figura 8



8. El bolso de señora. (a) *Observemos que el bucle de la media llave pasa por debajo de los cabos "paralelos".* (b) *Tiremos del bucle, llevándolo paralelamente a los cabos, hasta libertarlo del bolso.* (c) *Hagamos pasar el bucle alrededor del bolso; notemos que la posición obtenida es la de* (b), *aunque esta vez el bucle está por delante de los cabos.* (d) *Llevemos el bucle hacia la posición inicial haciéndolo correr a lo largo de los cabos; la posición obtenida corresponde a la de* (a), *pero con el bucle por delante de los cabos.* (e) *el bolso queda suelto*

Solicitemos entonces a un tercer voluntario que coloque un dedo en un punto de la porción descubierta de la alfombra. El mago plantea entonces la cuestión siguiente: si se retira una de las hojas de periódico y se tira del cordel, ¿quedará el dedo aprisionado por el bucle? En vista de la complejidad del bucle y dado que se encuentra oculto en su mayor parte, parece que será imposible responder. ¡Y sin embargo, el mago logra saberlo siempre!

¿Dónde está el secreto? Es consecuencia de la demostración del teorema de Jordan sobre curvas "lisas". En ella se prueba que, al tomar dos puntos cualesquiera del plano y unirlos por una curva que corta al bucle en un número finito de puntos, si este número de cortes es par, los dos puntos son ambos exteriores o ambos interiores; si es impar, uno de los puntos es interior y el otro exterior.

Mientras se va colocando el bucle, el mago se fija en un punto cercano al centro y perteneciente al exterior del bucle (*punto A de la figura 7*). Ha de memorizar la disposición del cordel en las cercanías, para poder volver a encontrar su punto más tarde, cuando hayan sido colocados los periódicos. Cuando el voluntario coloca el dedo, el mago cuenta cuántas veces se atraviesa el cordel al mover mentalmente el dedo su posición hasta el punto memorizado *A*. Si este número es par, el dedo es exterior al bucle, lo mismo que *A*, y no habrá dificultad en retirar la cuerda. Si es impar, el bucle rodeará al dedo.

El nudo desaparecido

Para este truco se necesita una escoba, un metro de cordel y una voluntaria que tenga un bolso de mano con dos asas. Anudemos los extremos del cordel, formando así un bucle, que fijaremos a una de las asas del bolso con una "media llave doble" (nombre de un nudo marinero, que se utiliza para fijar una cuerda a una argolla metálica), como vemos en la figura 8*a*. Pasemos el bucle por las asas del bolso, introduzcamos el palo de la escoba por el bucle y sostengámosla verticalmente, con la punta del mango apoyada en el suelo. Pidámosle ahora a la voluntaria que recupere su bolso sin deshacer el nudo.

El artificio consiste en hacer pasar el pequeño bucle de la figura 8*a* a través de la otra asa, como *b*, abrirlo más, hacerlo pasar alrededor de todo el bolso (*c*) y retirarlo devolviendo el bucle a su posición original (*d* y *e*). Pocas personas aciertan a descubrir el método, por lo que el ilusionista puede estar contento: tras los repetidos fracasos de la voluntaria, él será el primero en soltar el bolso.

El cuento del pirata y la chalupa, tan del gusto de los marinos, sirve de ilustración a un ejemplo más complejo. Un pirata había capturado un número de prisioneros demasiado grande para mantenerlos a bordo; así que los amontonó en una chalupa, que remolcó a popa. El pirata anudó una media llave doble a una argolla de amarre de la popa, añadió dos medias llaves que pasaban por cada banco de la barca, hizo pasar el bucle por la argolla de la roda de la barca y finalmente lo ancló al puente. ¿Cómo pueden hacer los prisioneros para soltarse? El truco resultará más fácil de comprender utilizando un modelo de cartón, como el de la figura 9, en la cual, de paso, se explican los términos de jerga marinera.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MATHEMATICS, MAGIC AND MISTERY. Martin Gardner, Dover Publications Inc., Nueva York, 1956.

THE ASHLEY BOOK OF KNOTS. Clifford W. Ashley, Faber and Faber, Londres, 1972.

Libros

Antonio Domínguez Ortiz, Luis Alonso y Ramón Margalef

España

Declive de Castilla

Los Austrias (1598-1799), por John Lynch. Crítica; Barcelona, 1993.

El profesor John Lynch es un acreditado hispanista inglés, bien conocido por todos cuanto se interesan por la historia moderna de España. La traducción efectuada a comienzos de los años setenta de sus dos volúmenes sobre *España bajo los Austrias* fue entonces uno de los manuales más frecuentados en las universidades españolas. Esta nueva versión de su obra forma el tomo XI de una Historia de España dirigida por él mismo y para la que ha seleccionado un valioso equipo en el que sólo hay una firma española: la de María Cruz Fernández, encargada del volumen consagrado a la prehistoria; todos los demás son historiadores anglosajones. Dos observaciones nos sugiere este elenco: satisfacción porque haya en países de lengua inglesa un público suficientemente amplio como para justificar la aparición de una obra de esta envergadura; y en segundo lugar, la comprobación de que no todos ceden a la tentación (que tan desastrosas consecuencias tiene en algunos programas docentes) de creer que sólo interesa la historia contemporánea. En la mencionada serie se peca por el extremo opuesto, pues se dedica un tomo a los visigodos que, por decirlo en términos vulgares, "pintan poco" en nuestro patrimonio cultural.

El título original es *The Hispanic World in crisis and change*, denominación muy apropiada para nuestro siglo XVII, mientras que el título *Los Austria*s, de la versión española, aunque va seguido entre paréntesis del ámbitp que abarca, no especifica de modo claro que se trata sólo de los llamados *Austrias menores:* Felipe III, Felipe IV y Carlos II. Es una materia perfectamente conocida por el autor, que no ha efectuado investigaciones sobre fuentes primarias, pero tiene el indudable mérito de conocer a fondo la inmensa literatura existente sobre España y su Imperio en aquella centuria y haber elaborado una síntesis clara, amena, juiciosa y bien informada, mezclando episodios y rasgos típicos con las líneas generales del relato. Tarea muy difícil, porque no es un relato unitario; son cien narraciones unidas por vínculos más o menos estrechos que unas veces tienen por escenario los salones del Palacio Real de Madrid, otras los campos de batalla de Flandes, las estancias del Vaticano, las costas, entonces muy peligrosas, del Mediterráneo, los campos de Castilla, en los que penaban campesinos subalimentados, y las minas de plata de Zacatecas, en los confines del mundo conocido.

En el prólogo el autor hace constar que aunque el libro se basa en su obra anterior ha procurado en esta nueva edición incorporar lo esencial de las investigaciones realizadas en los últimos años, y que han dado como resultado no sólo nuevos datos sino nuevos puntos de vista, a veces diametralmente contrarios a los tradicionales. La asociación habitual del siglo XVII con una época de crisis y decadencia está siendo muy contestada, y el tópico de "La crisis del siglo XVII" (no sólo en España sino en toda Europa) está dando lugar a fructíferas confrontaciones. En medio de la variedad de juicios, una cosa aparece clara: no hubo una sino muchas crisis, de distinto signo. En los aspectos económicos y sociales todas las naciones de Europa conocieron horas bajas, depresiones profundas, pero no a la vez ni con la misma gravedad: Alemania quedó destrozada; Francia, a pesar de los postizos esplendores de Versalles, también estaba muy mal en 1700. En cambio Holanda vivió una pequeña Edad de Oro.



Detalle de "El Conde-Duque de Olivares". El siglo XVII, desastroso en muchos aspectos, se elevó a cumbres sublimes en el campo del arte y la ciencia. Fue el siglo de Velázquez, Rubens, Rembrandt, Bernini, Galileo, Descartes, Newton y cien más

Dos fueron los azotes de aquel siglo: las pestes y las guerras, y ambos se cebaron en España, que pagó un pesado tributo a la muerte; aunque menos espectaculares, los efectos de la peste bubónica fueron mucho más mortíferos que los ensangrentados campos de batalla; pero parece indudable hoy que el estancamiento de la población española en el siglo XVII fue el resultado, el balance final de una serie de movimientos divergentes, compensándose las pérdidas de la Meseta con las ganancias humanas de las regiones periféricas.

Los tres Austrias españoles del XVII han atraído la atención de los investigadores, pero no en la misma proporción; Felipe III ofrece una imagen incolora, y los cambios durante sus 23 años de reinado no fueron sustanciales, pero sí lo fueron los 44 de Felipe IV, uno de los más largos y dramáticos de nuestra historia. Hoy no sólo están mejor perfiladas las figuras del rey y del Conde Duque de Olivares sino que se conocen con más exactitud las nefastas consecuencias en campos y ciudades de su política de prestigio imperial. El reinado de Carlos II venía siendo señalado como lo más profundo de la depresión; pero ha habido últimamente un cambio de perspectiva que mantiene un juicio muy crítico acerca de aquel rey y sus ministros, pero señala que el menor protagonismo de España en el exterior tuvo una recompensa: una modesta recuperación de una población menos acosada por las exigencias del estado.

Los capítulos más renovados de este libro respecto a su versión primitiva son los referentes a las Indias y el tráfico hispanoamericano. Lynch acepta la tesis de Morineau, que ha venido poco a poco imponiéndose; según ella, los tesoros de Indias no disminuyeron; fue el fraude el que aumentó, y por eso los registros ofi-

ciales dan una imagen falsa de la realidad. Esto es cierto. Pero también es indudable que la participación extranjera en la plata americana fue en aumento.

España ocupó un lugar destacado en el arte barroco y quedó muy retrasada en cuanto a la investigación científica. La ausencia de temas culturales es un fallo que se deja notar en este libro. (A. D. O.)

Geología

Conformación

ERASMUS BARTHOLIN. EXPERIMENTS ON BIREFRINGENT ICELANDIC CRYSTAL. Introducción de Jed Buchwald y Kurt Moeller Pedersen. The Danish National Library of Science and Medicine; Copenhague, 1991.

GIOVANNI ARDUINO (1714-1795), por Ezio Vaccari. Leo S. Olschki; Florencia, 1993.

REEVALUATION OF PALLAS' THEORY OF THE EARTH (1778), por Albert V. Carozzi y Marguerite Carozzi. Société de Physique et d'Histoire Naturelle; Ginebra, 1991.

PRINCIPLES OF GEOLOGY, por Charles Lyell. The University of Chicago Press; Chicago, 1990.

THE NEW CATASTROPHISM, por Derek Ager. Cambridge University Press; Cambridge, 1993.

En su configuración como teoría científica, la geología debe mucho a la cristalografía, que le aporta rigor físico y matemático. Uno de los primeros en aplicar el conocimiento geométrico-óptico a los minerales, a la calcita en particular, fue Erasmus Bartholin (1625-1698), autor de los *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici quibus mira et insolita refractio detegitur*, traducida ahora al inglés con el título de *Experiments on birefringent Icelandic crystal through which is detected a remarkable and unique refraction*, acompañada de una introducción donde la interpretación de los fenómenos descritos prima sobre el documentalismo erudito. Por decirlo con otras palabras, el lector tiene ante sí un opúsculo de historia de las ideas, de su génesis y alcance exacto.

Acostumbrado a las rarezas de gabinete, el coleccionista danés de hace trescientos años debió de quedar boquiabierto al ver dobles los objetos a través del pedazo de roca traído de Islandia. El propio monarca, Frederik III, impresionado, encargó en 1668 una expedición para beneficiarlo. Bartholin pasó de la admiración al estudio del fenómeno y dio a la imprenta sus resultados un año después. Tenía una larga preparación para ello.

Pertenecía a un tronco familiar del que brotaron físicos, médicos, botánicos y matemáticos afamados, que ocupan varias entradas en el "Gillispie" y otros diccionarios de historia de la ciencia. A su hermano Thomas se le reconoce el descubrimiento de la sigularidad del sistema linfático; su cuñado Ole Roemer demostró que la luz no se propaga instantáneamente, sino que invierte un tiempo.

Bartholin había comenzado la carrera de medicina en la Universidad de Leiden, pero se graduó en la de Copenhague en 1647. Volvió a Leiden, donde permaneció hasta 1651. Durante esta segunda estancia se familiarizó con la matemática, "sin la que nadie ha podido pensar o alcanzar algo que valga la pena", bajo el magisterio de Frans van Schooten, autor de una traducción latina anotada de la *Géométrie* de Descartes.

De Leiden pasó a Francia. Visitó también Italia e Inglaterra. Le siguió la fama de su libro. Henry Oldenburg, secretario de la Regia Sociedad Londiense, publicó un extenso sumario del mismo en las *Philosophical Transactions*. En París, a donde Jean Picard había llevado la calcita, Christian Huygens empezó a estudiar ese extraño fenómeno óptico; así nació su teoría sobre la luz. En resumen, pueden contarse con los dedos de la mano las obras que, como la de Bartholin, despertaran tanto interés en Europa. Los experimentos que éste realizó para desentrañar la aparición reiterada de la misma imagen, así como los fundamentos cartesianos de su teoría de la refracción, movieron a estudiar las rocas desde otro prisma.

Al estudio de las rocas y los minerales venían limitándose secularmente las incursiones geológicas. Y experto minero fue, en efecto, uno de los fundadores de la geología, Arduino, objeto de dilatada investigación por parte de Ezio Vaccari. *Giovanni Arduino (1714-1795). Il contributo di uno scienziato veneto al dibattito settecentesco sulle scienze della Terra* es un libro de erudición histórica que recopila trabajos anteriores sobre el mismo autor y su tiempo, con rastreo exhaustivo de fuentes dispersas y escasos errores de lugar y tiempo (Fausto Delhuyar no es vasco, sino riojano). Algo más endeble, sin embargo, resulta en el análisis interno de las ideas y de los procesos químico-mineros.

Si nos atenemos al tópico, repetiremos que la minería del siglo XVIII tiene su capital en Friburgo, la mineralogía, en Uppsala. La verdad es más compleja, y es toda Europa la que araña sus entrañas y da pie a formular las primeras hipótesis sobre la corteza terrestre y la textura de las cadenas montañosas: Buffon en Francia, Johann Gootschalk Wallerius y Tobern Bergman en Suecia, Johann Gottlob Lehmann en Alemania, Peter Simon Pallas en Rusia y Giovanni Arduino en Italia. Crean un lenguaje nuevo y levantan los primeros mapas.

Frente a lo que se supone habitual en un hombre ilustrado de la primera mitad del XVIII, la carrera académica de Arduino tuvo un color estrictamente práctico. Tras los estudios de dibujo y pintura, llega todavía adolescente a Clausen y otras minas del Tirol para aprender metalurgia, mineralogía y "cuanto se refiere al Reino Fósil". Podrá decir, por su propia experiencia, años más tarde, que el buen metalúrgico es aquel que se inició en geometría aplicada, adquirió luego conocimientos suficientes de mecánica y fluidos y pasó después a dominar la hidráulica y la arquitectura minera. Conviene que "sepa inferir con fundamento, de la faz externa de los montes, su estructura interna, que sea capaz de distinguir sus diferencias y discernir, por el aspecto de sus materiales componentes, cuáles sean los que encierran auténticos filones mineros, cuáles los presentan esporádicamente y cuáles carecen siempre de ellos".

Con la ayuda e incitación de Antonio Vallisnieri da el salto de la praxis minero-metalúrgica a la articulación de una teoría geológica. Sus lecturas han sido sobre todo francesas, vale decir, neptunistas y uniformistas: Buffon y de Maillet. Con el tiempo irá incorporando retazos de las tesis vulcanistas, necesarias para justificar la presencia de determinados minerales. Para Arduino, la corteza está formada por cuatro órdenes, o estratos rocosos. En la base, el orden más antiguo y principal, dominan las rocas cristalinas, que constituirían las montañas primarias; no habría en su seno signos de vida pasada. Sobre ellas, las montañas secundarias, de mármoles y calizas. Más jóvenes, las montañas terciarias son de arenas y arcillas, carentes de vetas minerales pero abundantes en restos marinos fosilizados. Las rocas sedimentarias, de aluvión, crean el cuarto y postrer orden montañoso.

Razona estas ideas en sendas cartas, publicadas en 1760: *Lettera prima di... Sopra varie sue Osservazioni Naturali* y, especialmente, *Lettera Seconda di... Sopra varie sue Osservazioni fatte in diverse parti del Territorio di Vicenza, ed altrove, appartenenti alla Teoria Terrestre, ed alla Mineralogia.*

Peter Simon Pallas (1747-1811), aunque había estudiado medicina en Halle, Göttingen y Leiden, sobresalió por el cultivo de la historia natural. Catalina II, la Grande, le invitó a formar parte de la Academia de Ciencias de San Petersburgo y en Rusia pasó cuarenta años de su vida. En un siglo de expediciones impulsadas por las coronas europeas, participó él en la que organizó la Academia de 1768 a 1774 por los dominios del imperio ruso, cuyos resultados recogió en sus *Viajes* escritos en alemán y traducidos al ruso, francés, inglés e italiano. Veinte años después de la primera campaña realizó un viaje al mar Caspio y aledaños.

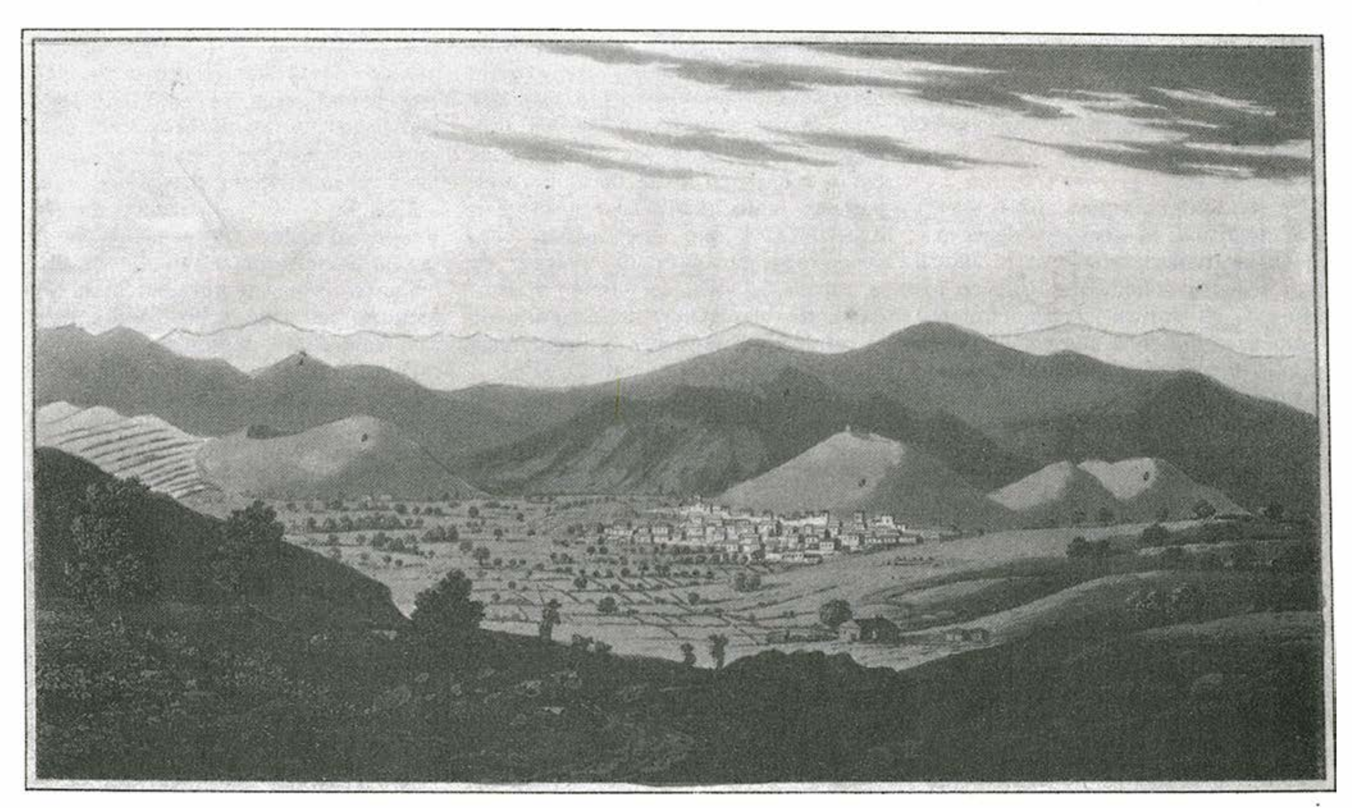
Los Carozzi desentrañan su principal aportación a la teoría geológica en un opúsculo denso y claro a la vez: *Reevaluation of Pallas' Theory of the Earth (1778).* Se ofrece la traducción al inglés de la original alemana más exacta que la versión francesa, que corrió de mano en mano por ser entonces el francés la lengua culta, la reacción a la contra de H. B. Saussure, la interpretación histórica del pensamiento de Pallas, el examen de su mapa de los Urales y las posibles incoherencias internas del autor.

Pallas esboza su teoría geológica en una conferencia, titulada *Sobre la naturaleza de las montañas y sobre los cambios acontecidos en el globo, en particular en el Imperio Ruso.* No basta, afirma, con las observaciones locales, limitación de los naturalistas de su tiempo, para establecer las causas de la aparición de las cordilleras, la estructura interna, o sólida, del planeta y sus catástrofes. Una teoría seria tiene que tener un alcance general. Y así, de acuerdo, con nuestro conocimiento de los montes escandinavos, Alpes suizos y tiroleses, los Apeninos, el Cáucaso e incluso los Andes, las montañas más altas que forman cadenas constan todas de granito, constituido siempre por cuarzo, más o menos mezclado con feldespato, mica y leves concentraciones de basaltos. La zona central de granito está delimitada a ambos lados por tres bandas principales: esquistos primitivos, rocas calcáreas secundarias y arcillas terciarias. Los nudos graníticos aparecieron a modo de islas, que se elevaron por un doble mecanismo de proceso volcánico y retirada de las aguas.

Aplica el dinamismo advertido en la configuración del planeta a la evolución de las formas de vida. Las montañas graníticas y las montañas esquistosas primitivas están desprovistas de fósiles; son, pues, anteriores a la creación de los seres vivos. Las montañas secundarias y terciarias, ricas en depósitos orgánicos, guardan los archivos de la naturaleza. Sitúa en la India la protolengua "de Asia y Europa" y admite la posibilidad de que los tibetanos procedan de los primates.

Los tanteos de esos siglos han ido surgiendo en torno a la dicotomía entre neptunistas y vulcanistas. Sin demasiada estridencia la pugna se sustituirá por otra doble corriente antagónica, catastrofistas y uniformitaristas. Cuvier y Lyell. La obra principal de éste, *Principles of Geology*, reeditada recientemente su primera versión por Chicago University Press con una presentación extensa de Martin J. S. Rudwick, no es, sin embargo, un escrito polémico, sino un tratado al nuevo uso de lo que debían ser los fundamentos de la geología científica.

Charles Lyell (1797-1875) dejó muy pronto el foro —una tradición familiar— por su afición a la historia natural, obligado por una enfermedad de los ojos. William Buckland le había despertado su interés por la geología. Y su inclinación hacia ésta le llevó a integrarse en la Sociedad Geológica Londinense, la primera en su género. En 1823, un viaje por la cuenca de París con



Esta vista de la región volcánica de Olot (España) aparece en el frontispicio del volumen tercero de los Principles of Geology, *de Charles Lyell, quien la visitó en el verano de 1830*

Constant Prévost le sugirió la idea de que sus estratos terciarios podían explicarse sin apelar a las drásticas convulsiones de que hablaba Georges Cuvier, el "catastrofismo" acuñado más tarde por William Whewell. Comparó luego depósitos escoceses recientes con las rocas parisienses y llegó a la conclusión de que el pasado se entendía cabalmente en función de los mismos procesos que estaban actuando en el presente. Más aún: esa uniformidad de clase e intensidad con que operaban los procesos constituía la causa real de los fenómenos observados; de ahí el carácter científico que imprimió a su opinión, denominada "uniformitarismo" por el propio Whewell.

En un comienzo Lyell compartía la visión direccional de la historia de la Tierra, que se habría desarrollado desde una configuración informe hasta su estado actual. Pero en 1827 trocó esa concepción, de sustrato materialista y transformista, mayoritaria entre los geólogos, por una teoría de estado estacionario, fundada en ideas avanzadas ya por James Hutton.

Aunque los *Principles* mantienen una sólida estructura interna, no se publicaron a la vez: el primer volumen apareció en 1830, el segundo en 1832 y el tercero en 1833. Con prosa de reminiscencias jurídicas, la primera sección es un juicio a la historia, más que un relato objetivo y distante de los antecedentes de la disciplina. Culpa del retraso de la misma al desconocimiento del valor del tiempo y a la deficiente interpretación de los procesos, en la que ha primado el énfasis en los fenómenos destructivos con minusvaloración de los constructivos.

Una descripción científica debe atender a los procesos inorgánicos, orgánicos y combinación de ambos en los fenómenos de fosilización. En los inorgánicos, ya sean acuosos o ígneos (sísmicos y volcánicos), importa averiguar la magnitud o alcance de la constante actuación de los mismos. Pero concede mayor interés a los procesos orgánicos. La vida, en opinión de Lyell, es la responsable principal de los acontecimientos del planeta, amén de la clave principal para entender su contextura. La influencia en Darwin de estas páginas del volumen segundo, donde expone la interacción de las especies con su medio, ha sido, hasta cierto punto, culpable de la lectura parcial de los *Principles*.

Cuanto antecede no es más que la preparación para descifrar la gramática de la geología, las grandes épocas y, en particular, la Terciaria, que divide en Plioceno (partido en antiguo y reciente), Mioceno y Eoceno. La teoría deja paso al examen de zonas que compendian el período. En el Plioceno, por ejemplo, se trata de la estructura del Etna y la zona volcánica de Olot, en España.

Vuelve, sin embargo, la postura antagónica al uniformitarismo. Ese es el núcleo del alegato, entre riguroso y desenfadado, de Derek Ager en *The New Catastrophism. The importance of the rare event in geological history*. Ager se crece cuando construye, en la mayor parte del libro, y peca de injusto cuando se propone defenestrar a Lyell por ayuno —le recrimina— de trabajo de campo. Frente a la doctrina "peligrosa" de éste defiende una historia geológica tejida de episodios violentos. Esa beligerancia comienza ya en el frontispicio: las pilastras romanas de Pozzuoli que, en los *Principles of Geology*, simbolizaban la acción persistente y cíclica del mar, representan ahora cambios repentinos y bruscos de nivel. Su héroe, Georges Cuvier, modelo de observación directa e interpretación ceñida.

Conviene saber leer el pasado y, sobre todo, qué textos podemos esperar encontrar. A ese postulado, clave de la obra, le dedica unas páginas brillantes agrupadas bajo el sorprendente epígrafe de "Magnolias y caléndulas; hipos y hiatos". El magnolio, como la encina, se conserva mejor que la caléndula, o la margarita, por la sencilla razón de que se trata de plantas leñosas. La fosilización es un proceso muy selectivo, que depende del organismo y del medio en que quedó enterrado; en virtud de lo segundo hay mayor proporción de hipopótamos fosilizados que de mamíferos de tierra adentro. Tampoco se preservará igual un lago cenagoso que una llanura pelada. Vale decir, la historia registrada de la Tierra no es la historia de lo realmente sucedido, sino sólo de aquello que quedó recogido. Además, sólo existe en la cabeza de los sedimentólogos la alegada "sedimentación continua", plagada como está la corteza de hiatos o saltos de deposición dispar.

Hasta los geólogos más renuentes han acabado por plegarse ante una prueba clara de episodio catastrófico: los Channeled Scablands, testimonios de un torrente de agua que, hace unos 12.000 o 15.000 años, cruzó los estados de Montana, Idaho, Oregon y Washington, cortando gargantas de basalto de 270 metros de altura. De carácter episódico y violento han sido siempre muchos huracanes, tormentas y terremotos en tiempos históricos, de turbia, si alguna, secuela. Si nos remontamos en el tiempo, los depósitos corresponden a sedimentos dejados por ríos, lagos y marismas; también quedan rastros de polvo y arenas de desiertos y llanuras: breves episodios todos ellos en términos geológicos, que nos hablan, por ceñirnos a un entorno próximo, de un mar de Tetis seco, convertido en desierto, con la extinción consiguiente, drástica, de la fauna marina. Pero no sólo desaparecen los organismos, de las líneas de costa tampoco queda señal en el archivo geológico; y muchos de los testigos que permanecen, como los famosos depósitos cretáceos-terciarios de Zumaya, tuvieron, por contra, una duración temporal efímera. Ager extiende su teoría geológica a la biología para proclamarse saltacionista empedernido, es decir, defensor de la evolución discontinua de los organismos. (L. A.)

Ecología teórica

Diversidad

BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM FUNCTION. Dirigido por Ernst-Detlef Schulze y Harold A. Mooney. Springer-Verlag; Nueva York, 1993.

La ecología tiene sus altos y sus bajos. La idea de la diversidad nació al comprobar ciertas regularidades en la cuantía de los individuos de especies diferentes que viven juntas; se encuentran pocas especies representadas por un gran número de individuos y cifras crecientes de especies de representación progresivamente más exigua.

Autores japoneses (Motomura, 1932) e ingleses (Fisher, Corbet y Williams, 1943) se ocuparon tempranamente de estas regularidades numéricas; pero fue MacArthur, en las décadas de los cincuenta y los sesenta, quien primero especuló sobre posibles relaciones entre la diversidad y la funcionalidad de los ecosistemas, sobre la base de que una diversidad mayor ofrecía más vías a la energía (cierto apoyo a la "seguridad" y, si se quiere, a la analogía de los "remaches", repetida varias veces en este libro) y más relaciones posibles en el seno del ecosistema. Muchas de estas especulaciones se recibieron con recelo, y se llegó a escribir sobre el "no-concepto de diversidad" (Hulbert, 1971).

Hoy, la palabra diversidad y especialmente en su nueva metamorfosis de biodiversidad, ha irrumpido en los medios de difusión con gran pujanza

y genera un gran entusiasmo para organizar reuniones y publicar libros que se refieren a la bendita diversidad. Este volumen es producto de un simposio celebrado cerca de Bayreuth, en octubre de 1991, apoyado por organismos internacionales y locales, prueba del interés por el tema.

Diversidad y biodiversidad se usan indistintamente, aunque a mí me parece que los estudiosos de la diversidad estaban más interesados en eventuales fuerzas organizadoras generadas por el funcionamiento del ecosistema, manifiestas en regularidades en la importancia numérica de las distintas especies en contacto, mientras que biodiversidad va adquiriendo el sentido de reserva genética de la biosfera.

Aunque ambas acepciones aparecen mezcladas, este volumen se preocupa quizá más por lo que llamaría diversidad, es decir, más por el mecanismo de la generación que por las garantías de preservación, lo que permite o lleva a contrastar ecosistemas y partes de ecosistemas de alta diversidad (la selva amazónica, el arrecife coralino son los ejemplos que siempre se acaba presentando) y otros de baja diversidad, como en un (mono)cultivo agrícola, en un cultivo de flujo o en un río.

Aunque hay un interés fundamental en la diversidad como expresión de la riqueza de la reserva genética de la biosfera, el contenido de este libro se orienta hacia el otro problema: tratar de entender lo que significa la diversidad en relación con el funcionamiento de los ecosistemas, algo a agradecer en unos tiempos en que se suele insistir en el valor de la reserva genética (la biodiversidad).

Claro que esta relación puede verse de muchas maneras. De una parte, la diversidad es necesaria para el funcionamiento de cualquier ecosistema. Pero también es el funcionamiento pasado del ecosistema —histórico— el que se expresa en la diversidad (biodiversidad) actualmente disponible. Una diversidad alta puede garantizar ciertas propiedades y una de las que más preocupan es la persistencia, en el sentido de que una diversidad alta permitiría absorber perturbaciones sin que el ecosistema de turno manifestara cambios importantes. Se repite la comparación entre las especies y los remaches que sujetan ciertos elementos de un avión; cuantos más remaches, menos puede afectar al conjunto un percance que haga saltar alguno de ellos. Así, la diversidad sería un seguro, una cosa intrínsecamente buena. Este símil me parece poco realista, porque la diversidad alta aparece también como un enriquecimiento histórico inevitable, si el ecosistema persiste en un entorno sin perturbaciones demasiado violentas que obliguen a volver a empezar una y otra vez. Por otra parte, la diversidad de un sistema puede ser el resultado de acomodar un determinado flujo potencial de energía, constante o variable, a un ecosistema que tiene a su disposición un número elevado de genotipos —o si no los tiene, los inventa— en unas condiciones que vienen dictadas por regularidades normales en la organización de los ecosistemas.

Tengo la impresión de que la mayoría de los colaboradores de este volumen se inclinan por el primer aspecto, mientras que el autor de esta reseña ve con mayor simpatía el segundo. A favor del primero va el interés suplementario por despertar la responsabilidad de respetar o conservar la naturaleza y su diversidad, que es un atributo esencial, una prueba del éxito de la evolución en el pasado y una garantía de la continuación de una biosfera que nos pueda seguir manteniendo.

No es fácil analizar de manera justa y sensible un libro como éste, cuyo contenido, además de un prólogo (P. R. Ehrlich) y unas conclusiones (E.-D. Schulze y H. A. Mooney), comprende cinco secciones (A: Función de los ecosistemas. B: Grupos funcionales. C: Interacción entre las especies. D: Interacciones en la comunidad. E: Integridad de los ecosistemas. F: Analogías con la industria y decisiones políticas) con un total de 23 artículos, muchos de los cuales van firmados por dos o más autores. Es imposible analizar artículo por artículo, y ni siquiera mencionar sus títulos, aunque sí puede decirse que en ellos se examinan muchos de los problemas de la ecología actual, señalando sus relaciones —a veces más bien tenues— con la idea de diversidad. En todo caso, la ordenación no es muy rigurosa y no conduce a nada positivo seguirla estrictamente.

En muchas partes del texto se consideran procesos ecológicos bien identificados, o situaciones que se dan en segmentos de la biosfera, que conducen a diversidades altas, con ejemplos sacados de la vegetación terrestre, de la agricultura y del mundo del plancton. En general, no hay clara conciencia de la posición especial de las plantas superiores, aunque en algunos lugares se recuerda la importancia de las clasificaciones de Raunkjaer y otras similares (Solbrig, etcétera), pero el significado de la madera, como sistema de transporte y soporte, y su reflejo en la diversidad, relativamente baja, de los macrófitos arbóreos en climas de tipo fluctuante, no se comenta con la deseable extensión. El tema aflora naturalmente en la relación con la agricultura y su posible optimación (como materia producida, no como biodiversidad) y, por supuesto, se hace notar que hay otros aspectos de la fisiología (fotosíntesis, equilibrio hídrico) cuya optimización conjunta no es sencilla por la complejidad del entorno y que, por tanto, son causa de diversificación.

Como se podía esperar, la consideración de la vida pelágica conduce a mencionar la paradoja del plancton, aunque el problema de las escalas y el espectro de turbulencia reflejado en el plancton no se examinan con el detalle deseable. El bucle microbiano, tan en boga, y que tiene un equivalente en la vida microscópica del suelo, lleva, inevitablemente, a tratar de la diversidad ataxonómica, en que los organismos se caracterizan por tamaños o funciones fisiológicas, en cuyas distribuciones se siguen observando regularidades comparables a las ya detectadas en la diversidad en su sentido prístino.

En esta colección hay trabajos de gente importante y en muchos de ellos aparecen ideas que merecen recogerse y desarrollarse, pero es tarea difícil ordenar los resultados que se obtienen espigando en tal campo. Mencionemos las jerarquías de la complejidad, importancia de las dimensiones, grupos funcionales y formas de vida (*life forms*), variaciones en el transporte de vapor de agua a través de las hojas (mucho más variable en plantas suculentas, máximo : mínimo = 333, que en dicotiledóneas herbáceas y de sombra). Las interacciones entre plantas y hongos o micorrizas, o con formadores de agallas, insectos y sus parásitos, son estrechas, frecuentemente específicas, y contribuyen a aumentar el número de especies y la biodiversidad. El concepto de "*keystone species*" (o especies clave) postula que no todas las especies revisten idéntico interés: árboles y elefantes, por ejemplo, pueden tener efectos más decisivos o más exagerados que otros productores primarios y secundarios menores y menos poderosos, en relación tanto con la persistencia como con la movilidad, respectivamente. Los experimentos de manipulación pueden ser importantes y pueden mostrar cómo debemos preocuparnos por un decrecimiento excesivo de la diversidad, como consecuencia de la manipulación humana.

Es valiosa la contribución de Lawton, en el sentido de que una mayor diversidad garantiza la redundancia en el funcionamiento del ecosistema, idea que relaciona con Elton. Tilman tam-



"Das grosse Rasentück". A. Durero

bién cree que los sistemas más diversos son más resistentes a las invasiones. Según Tilman todas las teorías de la sucesión están basadas en la interacción entre restricciones ambientales particulares y compensaciones internas ("trade-offs") en los organismos, y estos mismos agentes operan teóricamente en el mantenimiento de la diversidad. Quizá toda la teoría de la sucesión sea más o menos equivalente a una teoría del aumento y mantenimiento de la diversidad.

Un estudio de Pate y Hopper que destaca la diversidad de la flora australiana, con muchos endemismos, en su relación con factores ecológicos, ofrece, además, excelentes ilustraciones de especies que conocemos poco.

La diversidad, según Elton, y ahora según Pimm, es buena porque ayuda a mantener el equilibrio natural, seguramente por las vías alternativas que veía MacArthur en su aproximación al tema, y que fue muy criticada en su tiempo. McNaughton reflexiona sobre los ejemplos que proporcionan los pastos, y ve que la diversidad se relaciona de manera inversa con la productividad (tasa de renovación), presentando datos verídicos. La competencia puede ayudar a que la evolución contribuya a favorecer relaciones de equilibrio que acaban aumentando la diversidad.

Los modelos de variación latitudinal de la diversidad no gozan ahora del fervor de antaño, aunque se consideran comprobados en la vegetación de los bosques, donde importa considerar de manera correcta las condiciones de competencia que introduce la posesión de madera.

Es posible contemplar a la diversidad a escalas muy diferentes; hacia arriba tenemos la diversidad del paisaje, apreciada en regiones extensas, o bien en el mosaico de praderas, campos de cultivo y los setos que los bordean. Nunca se trata debidamente, y es de lamentar, la función que los retazos, reticulados o disyuntos, de comunidades naturales primitivas mejor o peor conservadas, pueden desempeñar en la conservación de biotas en paisajes fuertemente antropizados.

Esto hubiera podido abordarse en la sección de problemas industriales y políticos, que se limita a reflexionar sobre las enseñanzas ofrecidas por los modelos de virus de computadoras y a la toma de decisiones, cuyo enfoque correcto se sigue viendo lejano, en tanto que las ideas presentes continúen fluctuando considerablemente. (R. M.)

Ensayo

Susan Zolla-Pazner

Profesor, universidad e industria

Hasta hace poco, el ser profesor universitario no resultaba muy complicado: leías las revistas de tu especialidad, escribías tus artículos científicos, dabas clases y dirigías seminarios y tesis. Pero hoy las universidades se hallan en transición. Cada vez se da mayor importancia a la investigación, anteponiéndola a la docencia. Como las partidas destinadas a la investigación están mermando, cobran mayor peso las ayudas de la iniciativa privada, con lo que la universidad se va transformando en un laboratorio subsidiario de la industria. Para estar al día, los profesores han de leer sus revistas profesionales *y además la prensa de información económica*, han de escribir artículos científicos *y además* solicitudes de patentes, han de dar clases y, *además*, asesorar a los directivos de las empresas.

La interacción entre los hombres de ciencia, las universidades y la industria no es cosa nueva. Pero, al disminuir la subvención oficial y aumentar explosivamente la producción de novedades biotécnicas, se han intensificado esas relaciones. La interacción se ha hecho más compleja.

La administración universitaria y la industria deben desempeñar un papel en el desarrollo del conocimiento científico que germina y crece en el ambiente académico. La universidad suele ser responsable de la obtención de patentes y de que se les reconozcan a sus profesores los derechos a beneficiarse de sus inventos. La compañía explotadora ha de proporcionar el respaldo financiero que se requiere para fabricar y comercializar el producto.

En el mejor de los mundos posibles, inventores, gestores universitarios y ejecutivos funcionan como una máquina bien engrasada que crea un producto beneficioso y genera capital con el que sostener los costes del laboratorio académico y mantener al científico, a la universidad y a los accionistas de la compañía. En cambio, en el mundo real, cada uno de estos factores tiene su propia dinámica: sus objetivos y prioridades pueden no coincidir.

Sin embargo, a los tres les reporta mayores ventajas trabajar unidos. El científico recibe sustanciosas compensaciones y fondos para la investigación. Las colaboraciones entre los laboratorios académicos y los de la industria farmacológica sirven para ampliar la capacidad y el rendimiento de unos y otra. La universidad suma unos ingresos fijos. La compañía obtiene los derechos sobre un producto potencialmente lucrativo. Y el producto, si supera la carrera de obstáculos que se interponen entre el laboratorio y la cabecera del enfermo, pasará a ser utilizado clínicamente. ¿Qué precio se paga por estos beneficios? La respuesta dependerá de quién conteste a la pregunta.

El científico se encuentra obligado a participar en una alocada carrera de negociaciones y leyes. Las exigencias del tejemaneje de acuerdos sobre patentes y contratos consumen tiempo y energías. Algunas actividades investigadoras son reorientadas, dirigiéndose no ya a la ciencia básica, sino a fines más prácticos. Que la industria prometa seguir dando su apoyo financiero resulta seductor, pero va ligado inevitablemente a que los productos resulten comercializables, y aquí está el fondo del asunto. El laboratorio universitario puede convertirse entonces en mero ejecutor de los planes impuestos por la firma industrial. La espontaneidad del trabajo científico quedaría restringida. El profesor no podría contar con los datos o los reactivos nuevos. Las consecuencias serían, en el peor de los supuestos, desastrosas para el laboratorio universitario, perjudiciales para la ciencia y malas para la sociedad.

Por fortuna, los departamentos no caen hasta ese grado de total sumisión si el decano se las ingenia para diversificar sus fuentes de financiación. Pero el que la investigación disponga cada vez de menos ayuda oficial hace que el peor de los supuestos sea una posibilidad muy inquietante. Hay otros intereses. Por ejemplo, si una universidad pretende obtener beneficios de la comercialización del invento de uno de sus profesores, puede que, para no comprometer la institución en pleitos, dude si participar o no en las pruebas clínicas del producto.

Las universidades han padecido la frustración de ver cómo las licencias que de sus descubrimientos han vendido a compañías industriales, éstas se las han vuelto a vender después, por enormes sumas de dinero, a otras compañías, "pagos" luego encubiertos por una maraña contable, inaccesible a la universidad. Así, a no ser que el invento se convierta en un producto, las ganancias que logran las compañías "peloteando con el contrato" no son compartidas por los diseñadores del invento.

Entre tanto, la compañía va firmando cheques; pero, de las tres partes implicadas, ella es la que menos se compromete en su ya consagrado *modus operandi*: ha obtenido una idea o un producto y lo va a utilizar en su propio provecho. Naturalmente, en el proceso deberá discutirse la delicada cuestión de la libertad académica a la vez que se controla el acceso a la información sobre el producto... mas la firma comercial dirige el negocio como suele hacerlo.

De esta suerte, el científico, la universidad y la industria se hallan dentro de una autopista de tres carriles por la que las ideas que salen de la facultad marchan hacia el terreno de su aplicación. Y como en estos últimos años ha aumentado muchísimo el tráfico por esta autopista, los atascos y las colisiones se han hecho inevitables. Cada vez más, la investigación básica es desviada de la dirección que debería seguir. Tal desvío lentificará la marcha de los avances en ciencia básica convertibles en productos biotécnicos.

Para evitar semejante lentificación, se requieren unas nuevas reglas del tráfico por esta autopista. Es necesario que el gobierno invierta más, si se quiere restablecer el orden debido y que los laboratorios orienten sus esfuerzos hacia la investigación básica, que es la fuente de todas las tecnologías aplicadas. El científico y la universidad deben dejar de considerar a las compañías industriales como pesos ligeros en lo intelectual pero cargados de dinero, y aprender del mundo de los negocios cómo ha de intercalarse en los fines idealistas la realidad económica. Y lo que en la industria se suele opinar de que "el científico es el que hace lo fácil del trabajo" tiene que sustituirse por una visión más amplia, que permita al científico y a la universidad tomar parte a la hora de decidir cuál sea el mejor camino para el desarrollo. Sin estos ajustes por todos los lados, se frenará el curso de las ideas convertibles en productos, y todas las partes, incluida la sociedad en general, sufrirán las consecuencias de la retención.